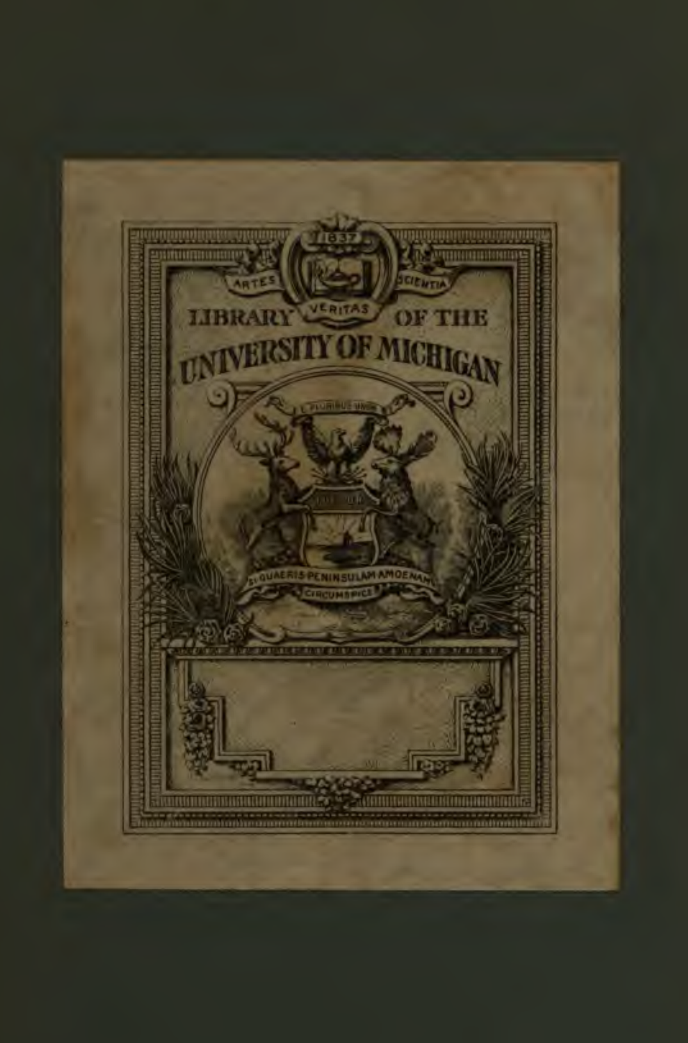

1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE



BIBLIOTHÈQUE

SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. ÉM. ALGLAVE

XCII

BIBLIOTHÈQUE
SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. ÉM. ALGLAVE

Volumes in-8°, reliés en toile anglaise. — Prix : 6 fr.

La *Bibliothèque scientifique internationale* n'est pas une entreprise de librairie ordinaire. C'est une œuvre dirigée par les auteurs mêmes, en vue des intérêts de la science, pour la populariser sous toutes ses formes, et faire connaître immédiatement dans le monde entier les idées originales, les directions nouvelles, les découvertes importantes qui se font chaque jour dans tous les pays. Chaque savant expose les idées qu'il a introduites dans la science et condense pour ainsi dire ses doctrines les plus originales. On peut ainsi, sans quitter la France, assister et participer au mouvement des esprits en Angleterre, en Allemagne, en Amérique, en Italie, tout aussi bien que les savants mêmes de chacun de ces pays.

La *Bibliothèque scientifique internationale* ne comprend pas seulement des ouvrages consacrés aux sciences physiques et naturelles; elle aborde aussi les sciences morales, comme la philosophie, l'histoire, la politique et l'économie sociale, la haute législation, etc.; mais les livres traitant des sujets de ce genre se rattachent encore aux sciences naturelles, en leur empruntant les méthodes d'observation et d'expérience qui les ont rendues si fécondes depuis deux siècles.

LISTE DES OUVRAGES PAR ORDRE D'APPARITION

93 VOLUMES IN-8.

Les ouvrages précédés d'un *astérisque* * sont recommandés par le Ministre de l'Instruction publique pour les Bibliothèques des lycées et des collèges.

1. J. TYNDALL. * **Les Glaciers et les Transformations de l'eau**, avec figures. 1 vol. in-8. 6° édition. 6 fr.
2. BAGEHOT. * **Lois scientifiques du développement des nations** dans leurs rapports avec les principes de la sélection naturelle et de l'hérédité. 1 vol. in-8. 6° édition. 6 fr.
3. MAREY. * **La Machine animale**. locomotion terrestre et aérienne, avec de nombreuses fig. 1 vol. in-8. 6° édition, augmentée. 6 fr.
4. BAIN. * **L'Esprit et le Corps**. 1 vol. in-8. 6° édition. 6 fr.
5. PETTIGREW. * **La Locomotion chez les animaux**, marche, natation. 1 vol. in-8, avec figures. 2° édition. 6 fr.
6. HERBERT SPENCER. * **La Science sociale**. 1 vol. in-8, 12° édit. 6 fr.
7. SCHMIDT (O.). * **La Descendance de l'homme et le Darwinisme**. 1 vol. in-8, avec figures. 6° édition. 6 fr.
8. MAUDSLEY. * **Le Crime et la Folie**. 1 vol. in-8 6° édition. 6 fr.
9. VAN BENEDEN. * **Les Commensaux et les Parasites dans le règne animal**. 1 vol. in-8. avec figures. 3° édition. 6 fr.
10. BALFOUR STEWART. * **La Conservation de l'énergie**, suivie d'une Étude sur la *nature de la force*, par M. P. de SAINT-ROBERT, avec figures. 1 vol. in-8. 6° édition. 6 fr.
11. DRAPER. **Les Conflits de la science et de la religon**. 1 vol. in-8. 9° édition. 6 fr.
12. L. DUMONT. * **Théorie scientifique de la sensibilité**. 1 vol. in-8. 9° édition. 6 fr.

13. SCHUTZENBERGER. * **Les Fermentations.** 1 vol. in-8, avec figures. 6e édition. 6 fr.
14. WHITNEY. * **La Vie du langage.** 1 vol. in-8. 4e édit. 6 fr.
15. COOKE et BERKELEY. * **Les Champignons.** 1 vol. in-8, av. fig. 6 fr.
16. BERNSTEIN. * **Les Sens.** 1 vol. in-8, avec 91 fig. 5e édition. 6 fr.
17. BERTHELOT. * **La Synthèse chimique.** 1 vol. in-8. 8e édit. 6 fr.
18. NIEWENGLOWSKI (H.). * **La photographie et la photochimie.** 1 vol. in-8, avec gravures et une planche hors texte. 6 fr.
19. LUYS. * **Le Cerveau et ses fonctions,** avec figures. 1 volume in-8. 7e édition. 6 fr.
20. STANLEY JEVONS. * **La Monnaie et le Mécanisme de l'échange.** 1 vol. in-8. 5e édition. 6 fr.
21. FUCHS. * **Les Volcans et les Tremblements de terre.** 1 vol. in-8, avec figures et une carte en couleurs. 5e édition. 6 fr.
22. GÉNÉRAL BRIALMONT. * **Les Camps retranchés et leur rôle dans la défense des États,** avec figures dans le texte et 2 planches hors texte. 3e édition. 6 fr.
23. DE QUATREFAGES. * **L'Espèce humaine.** 1 vol. in-8. 12e édit. 6 fr.
24. BLASERNA et HELMHOLTZ. * **Le Son et la Musique.** 1 vol. in-8, avec figures. 5e édition. 6 fr.
25. ROSENTHAL. * **Les Nerfs et les Muscles.** 1 vol. in-8, avec 75 figures. 3e édition. *Épuisé.*
26. BRUCKE et HELMHOLTZ. * **Principes scientifiques des beaux arts.** 1 vol. in-8, avec 39 figures. 4e édition. 6 fr.
27. WURTZ. * **La Théorie atomique.** 1 vol. in-8. 8e édition. 6 fr.
28-29. SECCHI (le Père). * **Les Étoiles.** 2 vol. in-8, avec 63 figures dans le texte et 17 pl. en noir et en couleur hors texte. 3e édit. 12 fr.
30. JOLY. * **L'Homme avant les métaux.** 1 vol. in-8, avec figures. 4e édition. 6 fr.
31. A. BAIN. * **La Science de l'éducation.** 1 vol. in-8. 8e édit. 6 fr.
32-33. THURSTON (R.). * **Histoire de la machine à vapeur,** précédée d'une introduction par M. HIRSCH. 2 vol. in-8, avec 140 figures dans le texte et 16 planches hors texte. 3e édition. 12 fr.
34. HARTMANN (R.). * **Les Peuples de l'Afrique.** 1 vol. in-8, avec figures. 2e édition. 6 fr.
35. HERBERT SPENCER. * **Les Bases de la morale évolutionniste.** 1 vol. in-8. 5e édition. 6 fr.
36. HUXLEY. * **L'Écrevisse,** introduction à l'étude de la zoologie. 1 vol. in-8, avec figures. 2e édition. 6 fr.
37. DE ROBERTY. * **De la Sociologie.** 1 vol. in-8. 3e édition. 6 fr.
38. ROOD. * **Théorie scientifique des couleurs.** 1 vol. in-8, avec figures et une planche en couleur hors texte. 2e édition. 6 fr.
39. DE SAPORTA et MARION. * **L'évolution du règne végétal** (les Cryptogames). 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
40-41. CHARLTON BASTIAN. * **Le Cerveau, organe de la pensée chez l'homme et chez les animaux.** 2 vol. in-8, avec figures. 2e éd. 12 fr.
42. JAMES SULLY. * **Les Illusions des sens et de l'esprit.** 1 vol. in-8, avec figures. 2e édit. 6 fr.
43. YOUNG. * **Le Soleil.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
44. DE CANDOLLE. * **L'Origine des plantes cultivées.** 4e édition. 1 vol. in-8. 6 fr.
45-46. SIR JOHN LUBBOCK. * **Fourmis, abeilles et guêpes.** Études expérimentales sur l'organisation et les mœurs des sociétés d'insectes hyménoptères. 2 vol. in-8, avec 65 figures dans le texte et 13 planches hors texte, dont 5 coloriées. 12 fr.
47. PERRIER (Edm.). **La Philosophie zoologique avant Darwin.** 1 vol. in-8, 3e édition. 6 fr.
48. STALLO. * **La Matière et la Physique moderne.** 1 vol. in 8. 3e édit., précédé d'une introduction par CH. FRIEDEL. 6 fr.
49. MANTEGAZZA. **La Physionomie et l'Expression des sentiments.** 1 vol. in-8. 3e édit., 8 planches hors texte. 6 fr.
50. DE MEYER. * **Les Organes de la parole et leur emploi pour la formation des sons du langage.** 1 vol. in-8, avec 51 figures, précédé d'une Introd. par M. O. CLAVEAU. 6 fr.

51. DE LANESSAN. * **Introduction à l'Étude de la botanique** (le Sapin). 1 vol. in-8, 2° édit., avec 143 figures dans le texte. 6 fr.
52-53. DE SAPORTA et MARION. * **L'évolution du règne végétal** (les Phanérogames). 2 vol. in-8, avec 136 figures. 12 fr.
54. TROUESSART. * **Les Microbes, les Ferments et les Moisissures.** 1 vol. in-8, 2° édit., avec 107 figures dans le texte. 6 fr.
55. HARTMANN (R.). * **Les Singes anthropoïdes, et leur organisation comparée à celle de l'homme.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
56. SCHMIDT (O.). * **Les Mammifères dans leurs rapports avec leurs ancêtres géologiques.** 1 vol. in-8, avec 51 figures. 6 fr.
57. BINET et FÉRÉ. * **Le Magnétisme animal.** 1 vol. in-8. 4° édit. 6 fr.
58-59. ROMANES. * **L'Intelligence des animaux.** 2 v. in-8. 2° édit. 12 fr.
60. F. LAGRANGE. **Physiologie des exercices du corps.** 1 vol. in-8. 7° édition. 6 fr.
61. DREYFUS. * **Évolution des mondes et des sociétés.** 1 vol. in-8. 3° édition. 6 fr.
62. DAUBRÉE. * **Les Régions invisibles du globe et des espaces célestes.** 1 vol. in-8, avec 85 figures dans le texte. 2° édit. 6 fr.
63-64. SIR JOHN LUBBOCK. * **L'Homme préhistorique.** 2 vol. in-8, avec 228 figures dans le texte. 4° édition. 12 fr.
65. RICHET (Ch.). **La Chaleur animale.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
66. FALSAN (A.). * **La Période glaciaire principalement en France et en Suisse.** 1 vol. in-8, avec 105 figures et 2 cartes. 6 fr.
67. BEAUNIS (H.). **Les Sensations internes.** 1 vol. in-8. 6 fr.
68. CARTAILHAC (E.). **La France préhistorique**, d'après les sépultures et les monuments. 1 vol. in-8, avec 162 figures. 2° édit. 6 fr.
69. BERTHELOT. * **La Révolution chimique, Lavoisier.** 1 vol. in-8. 6 fr.
70. SIR JOHN LUBBOCK. * **Les Sens et l'instinct chez les animaux,** principalement chez les insectes. 1 vol. in-8, avec 150 figures. 6 fr.
71. STARCKE. * **La Famille primitive.** 1 vol. in-8. 6 fr.
72. ARLOING. * **Les Virus.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
73. TOPINARD. * **L'Homme dans la Nature.** 1 vol. in-8, avec fig. 6 fr.
74. BINET (Alf.). * **Les Altérations de la personnalité.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
75. DE QUATREFAGES (A.). * **Darwin et ses précurseurs français.** 1 vol. in-8. 2° édition refondue. 6 fr.
76. LEFÈVRE (A.). * **Les Races et les langues.** 1 vol. in-8. 6 fr.
77-78. DE QUATREFAGES. * **Les Émules de Darwin.** 2 vol. in-8, avec préfaces de MM. E. Perrier et Hamy. 12 fr.
79. BRUNACHE (P.). * **Le Centre de l'Afrique. Autour du Tchad.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
80. ANGOT (A.). * **Les Aurores polaires.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
81. JACCARD. **Le pétrole, le bitume et l'asphalte au point de vue géologique.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
82. MEUNIER (Stan.). **La Géologie comparée.** 1 vol. in-8, avec fig. 6 fr.
83. LE DANTEC. **Théorie nouvelle de la vie.** 1 vol. in-8, avec fig. 6 fr.
84. DE LANESSAN. **Principes de colonisation.** 1 vol. in-8. 6 fr.
85. DEMOOR, MASSART et VANDERVELDE. **L'évolution régressive en biologie et en sociologie.** 1 vol. in-8, avec gravures. 6 fr.
86. MORTILLET (G. de). **Formation de la nation française.** 1 vol. in-8, avec 150 gravures et 18 cartes. 6 fr.
87. ROCHE (G.). **La Culture des Mers** (piscifacture, pisciculture, ostréiculture). 1 vol. in-8, avec 81 gravures. 6 fr.
88. COSTANTIN (J.). **Les Végétaux et les Milieux cosmiques** (adaptation, évolution). 1 vol. in-8, avec 171 gravures. 6 fr.
89. LE DANTEC. **L'évolution individuelle et l'hérédité.** 1 vol. in-8. 6 fr.
90. GUIGNET et GARNIER. **La céramique ancienne et moderne.** 1 vol. in-8, avec 69 gravures. 6 fr.
91. GELLÉ (E.-M.). **L'audition et ses organes.** 1 v. in-8, avec grav. 6 fr.
92. MEUNIER (Stan.). **La Géologie expérimentale.** 1 v. in-8, avec fig. 6 fr.
93. COSTANTIN (J.). **La Nature tropicale.** 1 vol. in-8, avec fig. 6 fr.

Coulommiers. — Imprimerie Paul BRODARD. — 1146-98.

LA

GÉOLOGIE

EXPÉRIMENTALE

PAR

STANISLAS MEUNIER
Professeur de Géologie au Muséum d'histoire naturelle de Paris

AVEC 56 FIGURES DANS LE TEXTE

PARIS
ANCIENNE LIBRAIRIE GERMER BAILLIÈRE ET Cie
FÉLIX ALCAN, ÉDITEUR
108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 108

1899

PRÉFACE

Le livre que je présente aujourd'hui au public est le résumé du Cours que j'ai professé en 1898 au Muséum d'histoire naturelle. Le sujet qu'il concerne est un de ceux qui me passionnent le plus, et voilà plus de trente ans maintenant que je le cultive, puisque c'est en 1867 que j'ai publié dans la *Presse scientifique des Deux Mondes* de J.-A. Barral, des *Expériences relatives au mode de formation des nodules de grès de Fontainebleau.* Ce travail de vraie Géologie expérimentale peut être considéré comme le premier chaînon d'une série que je n'ai jamais abandonnée.

Successivement préoccupé d'éclairer par l'expérimentation les problèmes les plus divers de la science géologique, je me suis convaincu chaque jour davantage de la haute efficacité de ce procédé d'étude et j'ai été de plus en plus encouragé à persévérer dans ses applications.

Les critiques ne m'ont pas manqué, mais les encouragements ont été nombreux aussi, — les premiers venant de savants qui suivant moi n'ont pas adopté un point de vue suffisamment large, — et les seconds des résultats obtenus et qui peu à peu sont devenus décisifs.

Ce n'est pas, il n'est aucunement besoin de le dire, que j'aie la prétention d'avoir inventé la méthode géologique expérimentale, et on trouvera dans les pages suivantes la mention de plus d'un travail remontant à des temps relativement anciens. Mais, si j'ai vu souvent les géologues appeler dans la voie qui les préoccupait la collaboration des expériences pour éclairer des problèmes spéciaux, — je n'ai vu nulle part que la Géologie expérimentale eût été traitée à part, comme une branche distincte de la science. M. Daubrée lui-même, malgré le titre plus large du volume

qu'il a publié (*Études synthétiques de Géologie expérimentale*), n'échappe pas à cette règle. Et j'ai cru qu'il importait beaucoup de traiter un sujet jusqu'ici négligé.

C'est bien autre chose en effet de faire des expériences dans telle ou telle direction et autre chose de rechercher ce que l'expérimentation peut donner comme procédé normal d'étude géologique; en un mot, de passer en revue, pour les rapprocher mutuellement, les résultats qu'on peut espérer de l'emploi systématiqne de la méthode expérimentale dans les différents chapitres de la science.

En faisant ce travail, je reconnus que plus d'un sujet était encore tout à fait vierge de toute tentative ayant un caractère synthétique, et que d'autres n'avaient point été traités d'une manière suffisamment complète. Je me suis efforcé de diminuer le nombre des sujets présentant ce caractère d'infériorité, et qui tout naturellement n'étaient ni les plus faciles ni les plus attrayants à étudier.

J'ai surtout développé mes résultats personnels en n'empruntant aux autres expérimentateurs que ce qui est nécessaire pour les faire bien comprendre, de façon que ce livre est un mémoire original. J'y ai partout adopté la troisième personne pour exposer mes propres recherches, comme s'il s'agissait de celles d'un autre, estimant que les explications présentées ainsi sont d'autant plus claires.

J'ai d'ailleurs, avec grand bénéfice pour le résultat final, accompli mon travail de deux façons simultanées et en quelque sorte parallèles : en préparant à la fois le cours dont j'ai parlé plus haut et que j'ai donné dans l'amphithéâtre du Muséum, et en réunissant des appareils et des produits de laboratoire dont l'ensemble constitue dès maintenant une collection unique jusqu'ici dans son genre et qui est placée sous les yeux du public dans des meubles spéciaux de la galerie de Géologie du Jardin des plantes.

Pendant que le texte du présent volume sera comme un écho des leçons de l'an dernier, les figures qui l'accompagnent constitueront comme un reflet de la nouvelle exposition.

S. M

LA

GÉOLOGIE EXPÉRIMENTALE

INTRODUCTION

De toutes les sciences naturelles la Géologie est la plus récente : à l'heure actuelle elle n'est pas beaucoup plus que centenaire, ce qui la fait — et de beaucoup — la petite cadette de ses deux sœurs, la Zoologie et la Botanique.

Les anciens, qui nous ont laissé maints écrits sur l'histoire des animaux, sur celle des plantes, voire sur beaucoup de minéraux, n'ont pas même soupçonné la Géologie.

Outre qu'un concours extraordinaire d'illusions, conduisant fatalement à la fausse interprétation des faits d'observation quotidienne, a conspiré pour cacher à l'homme la vraie situation de la Terre dans le monde et jusqu'à sa forme, — la Géologie, placée à la rencontre mutuelle des sciences naturelles, des

sciences physiques et des sciences mathématiques, recevant de chacune d'elles un contingent de données et leur fournissant à toutes, en échange, une foule de problèmes à élucider, ne pouvait se constituer qu'après leur solide établissement.

On rencontre bien à la base de presque toutes les religions une conception géogénique, mais ces systèmes souvent poétiques, parfois même grandioses, mais toujours gratuits, où seuls les érudits trouvent plaisir à noter des inspirations que la science a confirmées, n'ont pour les savants proprement dits qu'un très médiocre intérêt.

Le temps n'est plus à la conciliation de la révélation et de la science et l'on n'accorde plus qu'une attention distraite aux efforts de plus en plus rares tentés dans cette voie par les théologiens.

Sans doute c'est comme une continuation naturelle de ces rêveries initiales à tournure religieuse qu'il faut considérer les dissertations à fausse apparence scientifique qui leur ont succédé si longtemps, et dont le semblant de précision tient uniquement à ce que l'opinion préconçue qu'il s'agit d'y faire prévaloir n'est plus simplement affirmée, mais entourée de faits plus ou moins bien observés qu'on invoque à son appui et comme preuves.

Descartes, entre autres, pour citer un exemple illustre, développe en ses *Principes de Philosophie* sa manière de voir sur l'origine de notre globe, sur la structure et la composition des profondeurs terrestres, sur le mode de formation des chaînes de montagnes.

On retrouve avec curiosité dans ces pages éloquentes divers faits que la science n'a pas contredits; mais il faut bien reconnaître que ces quelques vérités de hasard, noyées au milieu de beaucoup d'erreurs, ne présentent aucun caractère auquel on eût pu les en distinguer. Pour parvenir à les formuler, l'auteur du *Discours sur la Méthode* n'a point fait usage du véritable procédé scientifique et il faut les interpréter à peu près comme on fait des textes sacrés.

D'ailleurs, de nos jours encore et malgré la connaissance bien acquise de la méthode qui, à l'exclusion de toute autre, conduit à la découverte des vérités naturelles, certains esprits persistent à édifier des conceptions géogéniques dont ils croient fermement avoir démontré l'exactitude, alors que, renversant étrangement les rôles, ils constatent qu'on ne saurait prouver qu'à la rigueur, les choses n'eussent pu se passer comme ils les conçoivent.

On s'avisa pourtant, mais bien récemment, de cette réflexion que la science de la Terre devra résulter pour nous, bien moins d'intérieurs efforts d'imagination toute pure que de l'étude attentive de la Terre elle-même.

Il ne fallut rien moins que ce point de vue nouveau pour fonder la science; mais à partir de ce moment, elle exista, et ses progrès, jusque-là nuls, devinrent tout à coup extraordinairement rapides. L'observation de plus en plus précise s'étendit de toutes parts et les études locales, en se multipliant, préparèrent la description générale du globe tout entier.

Nous ne ferons d'ailleurs aucune difficulté de reconnaître que la rapidité véritablement vertigineuse des progrès de la Géologie tient sans aucun doute pour une part aux enseignements indirects qu'elle a reçus des autres sciences, ses aînées, et qu'ayant été dispensée, grâce à elles, d'inventer la méthode scientifique plus ancienne qu'elle-même, elle n'a eu qu'à l'appliquer.

Toutefois, la notion de la structure des régions superficielles de la Terre, seules accessibles au regard, n'atténua pas, bien au contraire, notre besoin de savoir comment la planète a pris les caractères qu'elle présente aujourd'hui; le nombre des problèmes sans solution augmenta même très vite avec la variété des informations obtenues.

Il est vrai que dans beaucoup de cas, et grâce à la célèbre et féconde doctrine dite des Causes actuelles, l'observation seule put satisfaire notre curiosité en assignant leur véritable origine à une foule de faits géologiques. Mais il en restait un certain nombre, et des plus importants, qui, ne se produisant pas sous nos yeux, n'étaient pas de nature à être abordés par la même voie.

Comment se sont constituées les roches cristallines? Comment, une fois produites, ont-elles acquis les dispositions remarquables qu'on leur connaît en bancs ondulés, rompus par des failles, redressés et réduits en minces feuillets, souvent remplis en même temps de fossiles et de minéraux cristallins?

Pourquoi les montagnes sont-elles disposées en

chaînes et pourquoi les chaînes sont-elles parfois orientées les unes par rapport aux autres suivant des lois d'ordonnance particulière? A quoi attribuer le phénomène volcanique, le remplissage des filons? Par quelles réactions expliquer la production première du revêtement solide du globe, fluide jusque-là? Et maintes autres questions.

Dans toutes ces directions, l'observation seule était impuissante évidemment. Aussi est-ce par une nouvelle transformation devenue nécessaire, que la Géologie agrandit son domaine et s'adjoignit de nouveaux procédés d'information.

Ces phénomènes qui se sont réalisés à une époque où personne n'était là pour les observer, — ces réactions qui se déclarent en des gisements où l'on ne saurait pénétrer, — ces effets qui se produisent avec une lenteur dont ne saurait s'accommoder la brièveté de la vie humaine, — on eut l'idée de les reproduire artificiellement, de faire de la Géologie expérimentale.

Les expériences inconscientes.

L'entreprise était bien hardie.

Elle eût pu toutefois être justifiée d'avance par tout un ordre de faits participant à la fois aux deux domaines de l'observation et de l'expérience : résultats fortuitement observés d'expériences instituées d'une manière inconsciente, et qui auront pour nous le prix inestimable de constituer des intermédiaires vérita-

bles entre les observations ordinaires et les expériences proprement dites.

Quand, pour se concilier la divinité du lieu, un malade jetait, il y a 2000 ans, une médaille de bronze dans la source minérale à laquelle il venait demander la santé, il était bien loin de supposer qu'il disposait ainsi une véritable expérience de minéralogie synthétique — et le charretier qui vidait jadis en une décharge publique de la « Porte Saint-Antoine » son tombereau rempli de plâtras et de boue, ne s'imaginait certes pas qu'il préparait des documents à la pétrogénie. L'homme d'avant l'histoire qui, dans tant de localités et par des procédés encore si mal connus, a réalisé cette idée de Titans, de souder ensemble par le feu les énormes blocs de granit dont il contruisait ses fortifications, serait bien indifférent à la description des minéraux cristallisés auxquels la roche fondue par lui a donné naissance.

Et cependant, sans le superstitieux malade, sans le manœuvre du vieux Paris, sans l'auteur anonyme des « forts vitrifiés », nous ne saurions pas qu'à la faveur des siècles l'eau thermale refait aux dépens du bronze les minerais mêmes d'où le métallurgiste extrait le bronze; — que le soufre natif des terrains stratifiés résulte en certains cas de la réduction du plâtre par les matières organiques; — que les minéraux fondamentaux des roches cristallines, feldspathiques, pyroxéniques, peuvent dériver du granit fondu.

Ces exemples d'expériences géologiques *spontanées*, si l'on peut ainsi dire, pourraient être multipliés beau-

coup : un coup de tonnerre met le feu à une grange, à une meule ; l'ignorant retrouve ensuite avec effroi sur le lieu du sinistre une masse grisâtre, et sous le nom de « pierre de foudre » impute l'incendie à sa chute. C'est le produit de fusion de la cendre des graminées, et le microscope y révèle une foule de minéraux cristallisés. Il a fallu que l'homme accumulât la substance végétale qui a brûlé : les minéraux produits sont donc artificiels, au moins en partie.

De même, les embrasements spontanés des houillères qui transforment de vastes régions jusque-là fertiles en districts d'apparence volcanique ; — ces embrasements déterminent, à la faveur d'une vraie expérience dont l'homme est l'auteur, la production de nombreuses imitations géologiques qui, pour avoir été involontaires, n'en sont pas moins pleines d'intérêt. Les schistes fondus longtemps et lentement refroidis se métamorphosent en véritables laves de volcans ; les grès vitrifiés se débitent par retrait en colonnades prismatiques ; les argiles donnent des thermantides, des porcelanites ; — et l'abondance des minéraux engendrés dans toutes les parties du sol achève de communiquer à l'ensemble les caractères des terrains métamorphiques.

Sur une échelle moindre, dans les usines, les reproductions fortuites de minéraux sont de tous les instants. En maintes circonstances, les « laitiers » qui se figent prennent l'état cristallin, et on en peut extraire, à l'exemple fameux de Mitscherlich, plus de quarante espèces cristallisées dont beaucoup sont

identiques à celles de la nature. Ce sont le pyroxène, le péridot, le mica, la pyrite, la blende, la galène et bien d'autres. Le four à cuivre de Sangershausen engendre du feldspath, les forges catalanes laissent cristalliser la magnétite et le refroidissement de la fonte de fer fournit aux collections des imitations rigoureusement exactes du graphite ou mine de plomb.

A côté des reproductions de minéraux, les fac-similés à petite échelle des phénomènes géologiques demandent à être cités. C'est ainsi qu'à propos de volcans, Ordinaire rapporte un accident survenu en 1801 en Angleterre et qui prendrait, s'il était voulu, toutes les apparences d'une vraie expérience : « Un haut fourneau à fer contenant environ soixante mètres cubes de métal et de pierres fondues ou en incandescence, fut entouré par une inondation : à l'instant où l'eau parvint dans le creuset, il s'éleva verticalement, et à trois reprises différentes, des colonnes de feu de l'éclat le plus vif; c'étaient les matières en fusion. L'explosion les dispersa tellement qu'on n'en trouva pas de vestiges autour de la fonderie : au moment où elle se fit, tout ce qui était dans le voisinage fut fortement ébranlé. »

Un autre fait du même genre est relaté par Spallanzani [1]. « Sous un portique, à Modène, on devait fondre une grande cloche; déjà le métal était en liquéfaction. On lui ouvre le canal de communication construit sous terre à peu de distance. A peine le bronze

1. *Voyages dans les Deux-Siciles*, traduit par Toscan, t. III, p. 244, 1798.

enflammé l'eut-il touché, qu'il en partit une explosion qui lança en l'air et le métal et le moule et une prodigieuse quantité de terre; le fourneau fut mis en pièces, le portique ébranlé, les murs se fendirent, les poutres du toit furent emportées, les tuiles chassées au loin et enfin à la place de la cloche on ne vit plus qu'un gouffre large et profond. Plusieurs des assistants furent tués et la terreur fut à son comble. » « Un si funeste accident, ajoute Spallanzani, ne fut cependant occasionné que par un peu d'humidité qui était restée dans le moule. En comparant l'effet avec la cause, on doit juger de celui qui résulterait d'un grand amas d'eau réduit en vapeur dans les fournaises volcaniques, et des moyens que la nature a en son pouvoir pour faire sortir du sein de la terre les plus épouvantables explosions. »

Dans une tout autre direction, les Echevins de Thoune, en 1714, dérivent la Kander pour la déverser dans le lac : il en résulte pour le régime du cours d'eau, grâce à la pente qui lui est ménagée, un changement de régime qui jette du jour sur le mécanisme du creusement des vallées.

De même, en 1840, on construit au val Fleury, près de Meudon, le viaduc de la ligne de Versailles (rive gauche). La surcharge infligée à l'argile plastique la refoule, la soulève et provoque la chute de plusieurs constructions — nous édifiant du même coup sur les conséquences nécessaires de l'accumulation successive des sédiments sur une même verticale.

Et que d'autres faits nous pourrions mentionner ! La

construction de la digue du mont Saint-Michel détermine, lors de la marée montante, des remous d'où résultent à la fois des affouillements de l'îlot et le dépôt de sédiments de plus en plus abondants. Le déboisement des montagnes modifie le régime des eaux sauvages et provoque des ravinements dont on peut suivre les progrès pas à pas. — A la Grand'Combe, en 1895, et bien ailleurs, des tranchées amènent des glissements tout comparables à ceux qui spontanément se déclaraient au Rossberg en 1806, au Piton des Neiges en 1877, etc. En combien de lieux l'ouverture de galeries souterraines comme celles des mines n'a-t-elle pas eu comme contre-coups la production de vrais effondrements tout pareils à ceux que provoque la longue circulation des eaux dans les cavernes ? Tout récemment, à Lens, on l'a constaté de nouveau.

Constitution de la méthode expérimentale.

On pourrait croire, en présence de cette multitude de résultats, que la Géologie expérimentale a dû se constituer toute seule, d'elle-même, en dehors de toute conception générale.

Il n'en est rien.

D'abord, la constatation des faits qui viennent d'être énumérés comme exemples n'était pas facile : elle fut souvent l'effet du hasard et exigea toujours une grande perspicacité.

En second lieu, et ceci est à l'honneur des géolo-

gues, elle ne précéda point le projet grandiose d'imiter la nature.

On ne connaissait ni les médailles corrodées des thermes romains, ni le soufre contemporain du sous-sol de Paris, ni les cristaux des forts vitrifiés ou des houillères embrasées, — quand Leibnitz écrivait[1] que : « la génération des minéraux est éclairée par la chimie », et quand, développant cette proposition, il ajoutait :

« Il fera, selon nous, une œuvre importante, celui qui comparera soigneusement les produits de la Nature tirés du sein de la terre avec les produits des laboratoires; car alors brilleront à nos yeux les rapports frappants qui existent entre les produits de la Nature et ceux de l'art...

« La Nature, en effet, n'est pas autre chose qu'un art plus en grand et on ne distingue pas toujours nettement ce qui est factice de ce qui est naturel...

« Dans nos faibles essais nous ébauchons ce que la Nature a exécuté en grand, elle qui pour alambics a les montagnes et les volcans pour fourneaux. »

On ne connaissait pas davantage les reproductions involontaires signalées tout à l'heure de minéraux et de roches, à l'époque où notre grand Buffon, guidé par de simples vues théoriques, soumit les pierres granitiques à la fusion.

Il nous sera bien permis de nous enorgueillir de voir ainsi le nom si français de Buffon à l'origine de la Géologie expérimentale.

1. *Protogée.*

Toutefois James Hall, le disciple et le continuateur de Hutton, alla beaucoup plus loin dans la même voie et obtint, dès le siècle dernier, des résultats qui, soumis récemment aux contrôles perfectionnés que permet l'outillage actuel de la science, doivent désormais être considérés comme les premières reproductions expérimentales de roches naturelles.

Hall les obtint d'ailleurs dans des conditions particulièrement intéressantes et dont le récit fait partie intégrante de l'histoire même de la Géologie. Principal défenseur de l'école écossaise, Hall empruntait à l'expérimentation des arguments contre les vues beaucoup trop exclusives de Werner et de ses élèves.

La synthèse par voie de fusion du *whinstone* des environs d'Edimbourg démontra à tout le monde que les roches maintenant et définitivement qualifiées d'éruptives, ne sont point, comme le voulait la doctrine de Freyberg, des dépôts aqueux provenant des mers primitives; mais que la chaleur a présidé à leur élaboration.

Cette notion primordiale, reprise de nos jours, a fourni entre les mains des expérimentateurs la synthèse de beaucoup de roches volcaniques, et l'on sait par exemple maintenant, pour en avoir suivi pas à pas toutes les phases, que la constitution des basaltes et des laves, aux dépens du magma fluide d'où ils dérivent, se fait en plusieurs temps successifs.

Comme on le pense bien, la série est longue des roches imitées dès maintenant par la *Méthode de Hall*,

qui consiste dans une fusion suivie d'un refroidissement très lent, permettant, par voie de dévitrification ou de recuit, la cristallisation de composés définis dans la masse générale déjà plus ou moins consolidée : elle comprend la plupart des roches volcaniques et éruptives.

Mais cette méthode ne s'applique ni aux roches stratifiées, cela va sans dire, ni aux roches métamorphiques, ni aux roches fondamentales, qui manifestement résultent de phénomènes tout différents.

Les sciences collaboratrices de la Géologie.

Constatons d'ailleurs que parmi les sciences naturelles, la Géologie est exceptionnellement favorable aux applications de la méthode expérimentale.

Comme je le rappelais il n'y a qu'un instant, elle constitue comme un carrefour, où se rencontrent nombre de sciences parfaitement distinctes par leur objet comme par leurs méthodes particulières et qui viennent se fusionner dans une collaboration intime dont elle sait profiter.

La mathématique collabore à la Géologie de plusieurs façons; et la *géométrie* tire son nom de cette parenté même. C'est par son paragraphe astronomique qu'elle nous renseigne sur la forme et la dimension de notre planète.

Quand Biot et Arago mesurent l'arc d'un méridien, ils font vraiment de la Géologie.

Et il en est de même encore quand La Condamine et ses successeurs déterminent en divers lieux l'intensité de la pesanteur. Si bien que M. Faye en conclura des notions sur l'épaisseur probable de la croûte terrestre en différentes localités.

Il va sans dire que la mathématique trouve bien d'autres occasions de s'appliquer aux sciences géologiques, si bien que la détermination des espèces minéralogiques résulte couramment de mesures d'angles et de calculs de formes et de dimensions.

Et n'est-ce pas à des ordres de considérations bien voisines que se rattachent les phénomènes de mécanique terrestre, soit relativement à l'allure de notre globe dans l'espace : rotation diurne et rotation annuelle avec les forces centrifuge et autres qui entrent en jeu, — soit relativement à des déplacements relatifs de portion du sol, comme le dépôt des sédiments par suite de destruction de la force vive de leurs véhicules, etc.

L'hydrodynamique est riche en conséquences proprement géologiques.

A la physique se rattachent des études sur la *cause* même de la chaleur originelle du globe et sur la vitesse de son refroidissement séculaire.

L'histoire des glaciers est de même éclairée par les lois de la chaleur; — et celles de l'électricité et du magnétisme intéressent aussi la Géologie de façons fréquentes et variées.

La physique a sans doute son maximum d'utilité géologique quand elle nous procure, par l'optique, une

série de procédés d'étude qui nous révèlent les particularités les plus intimes de la structure des minéraux cristallisés.

Si bien que nous ne considérons plus une roche comme connue si nous ne l'avons pas soumise au microscope dans la lumière polarisée, après l'avoir réduite en lame mince.

La chimie prête son concours à notre science à tous les instants; ses méthodes nous procurent la connaissance de la composition des minéraux et des roches et nous fait pénétrer dans le mystère de leur origine et de leur mode de formation.

La biologie, enfin, nous fournit des lumières décisives non seulement pour la reconstitution des êtres dont les fossiles sont les débris, mais encore pour éclairer les conditions dans lesquelles chacun d'entre eux a vécu; pour restaurer la météorologie de chaque période, pour élucider en un mot les grands traits de l'évolution terrestre.

Les considérations relatives à la géographie zoologique et à la géographie botanique ont des contrecoups directs sur l'histoire des êtres vivants à toutes les époques. M. E. Blanchard a conclu de recherches analogues des faits concernant l'*histoire géologique* de la Méditerranée.

En résumé et conformément à notre assertion de tout à l'heure, nous voyons les sciences les plus diverses collaborer véritablement à la constitution de la Géologie.

Expériences géologiques réalisées par des savants non géologues.

Aussi pourrions-nous constater la collaboration effective *au point de vue expérimental* d'une foule de savants qui ne sont aucunement des géologues et qui contribuent à l'œuvre commune sans sortir un seul instant du cadre précis de leur spécialité propre.

C'est en tête de cette véritable pléiade qu'il convient de citer Plateau, illustre savant belge qui a fourni à la magistrale théorie cosmogonique de Laplace la vraie sanction dont elle puisse se prévaloir.

Il est parvenu en effet, comme tout le monde le sait, à réaliser effectivement les conditions attribuées par Laplace à la substance cosmique primitive : il a montré qu'une goutte d'huile soustraite à l'action de la pesanteur par sa submersion dans un milieu (mélange d'eau et d'alcool) qui exerce sur elle une poussée égale à son propre poids — prend la forme rigoureusement sphérique.

Il a fait voir en outre que cette sphère fluide et sans pesanteur, obéissant seulement à l'attraction exercée sur elle par son propre centre de gravité, se déprime dans ses régions polaires dès qu'on la fait tourner autour d'un de ses diamètres. C'est là vraiment de la Géologie expérimentale et, je le répète, rien n'équivaut à la sûreté de cette matérialisation comme contrôle de la théorie.

Et j'en dirai autant de cette autre expérience non

moins célèbre par laquelle Léon Foucault a rendu tangible le mouvement diurne de rotation de la Terre.

Tout le monde connaît l'expérience du pendule et surtout tout le monde a manipulé le gyroscope, mais on n'a pas insisté assez sur le caractère géologique du travail de Foucault.

Il s'agit bien là (on ne saurait trop le répéter) d'un trait essentiel de l'économie terrestre. Les observations astronomiques sont impuissantes à le démontrer rigoureusement, car on ne voit dans ce qu'elles nous donnent qu'un déplacement relatif du point de la terre et de la voûte céleste, et plusieurs dispositions des choses pourraient en être la cause.

Foucault, au contraire, nous procure un plan d'observation rigoureusement fixe et il nous montre le globe terrestre tournant au-dessous de lui.

A cet égard son premier mémoire du 3 février 1851[1] est un modèle parfait, digne d'une étude attentive.

Il montre que, grâce à l'inertie, le plan d'oscillation d'un pendule ne suit pas le mouvement de rotation de son support, et il le montre par une expérience :

« L'indépendance du plan d'oscillation et du point de suspension peut être rendue évidente par une expérience qui m'a mis sur la voie et qui est très facile à répéter. Après avoir fixé sur l'arbre d'un tour et dans la direction de l'axe, une verge d'acier ronde et flexible, on la met en vibration en l'écartant de sa position d'équilibre et en l'abandonnant à elle-même.

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences.*

Ainsi l'on détermine un plan d'oscillation qui, par la persistance des impressions visuelles, se trouve nettement dessiné dans l'espace; or on remarque qu'en faisant tourner à la main l'arbre qui sert de support à cette verge vibrante, on n'entraîne pas le plan d'oscillation. »

Ceci étant posé, il est évident que si on pouvait s'établir au pôle même de rotation de la Terre, le plan d'oscillation du pendule resterait absolument fixe et le globe tournerait au-dessous de lui de façon à faire un tour entier en vingt-quatre heures.

Mais à mesure qu'on descend vers nos latitudes, le plan de l'horizon prend sur l'axe de la terre une position de plus en plus oblique, et la verticale, au lieu de tourner sur elle-même comme au pôle, décrit un cône de plus en plus ouvert.

Il en résulte un ralentissement dans le mouvement apparent du plan d'oscillation, mouvement qui s'annule à l'équateur pour changer de signe dans l'autre hémisphère.

Dans tous les cas, le déplacement angulaire du plan d'oscillation est égal au mouvement angulaire de la terre dans le même temps, multiplié par le sinus de la latitude.

A Paris, avec un pendule de deux mètres de longueur, le déplacement est tel qu'après une demi-heure seulement d'expérience, il saute aux yeux.

Pour le dire en passant, le phénomène d'inertie mis à profit par Foucault présente la plus étroite ressemblance avec celui qu'on applique à la construction des

sismographes et dont on a fait un vrai réactif des micro-tremblements de terre.

Dans son mémoire sur le gyroscope, Foucault s'élève encore plus haut dans la philosophie de la question : « Vous n'avez plus seulement sous les yeux, comme avec le pendule, dit-il, le déplacement progressif d'un plan idéal, plus ou moins bien défini par la trajectoire d'une masse oscillante; vous possédez des pièces matérielles, réellement soustraites à l'entraînement du mouvement diurne[1]. »

Il montre que le gyroscope étant en mouvement, son axe de rotation ne peut se trouver en équilibre que dans le plan du méridien. D'où il conclut que, sans le secours d'aucune observation astronomique, la rotation d'un corps à la surface de la terre suffit à indiquer le plan du méridien. Première étape vers cette autre découverte, que tout corps tournant autour d'un axe, libre de se diriger sans sortir du méridien, s'oriente parallèlement à l'axe du monde et de manière à tourner dans le même sens que la Terre.

L'espèce d'analogie qui se dégage d'elle-même à ce sujet entre le corps tournant qui s'oriente et l'aiguille aimantée et que Foucault a eu soin de signaler, — en même temps qu'elle est peut-être de nature à éclairer l'essence même des phénomènes magnétiques, — nous servira de transition vers d'autres travaux où nous sommes autorisés à voir une collaboration fournie par des physiciens à la Géologie.

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXV, p. 423.

C'est en effet dans cette catégorie que se place sans doute l'ensemble des études d'Ampère sur le magnétisme terrestre et les expériences qu'il réalisa avec les solénoïdes.

Sans y insister, faute de place suffisante, remarquons seulement qu'elles constituent comme un type d'expériences de physique dont la Géologie tire un bénéfice immédiat. M. Moureaux nous en a fourni un exemple bien remarqué, il y a très peu d'années encore.

L'expérience d'où Cavendish a tiré la mesure du poids de la Terre est aussi, pour une bonne part au moins, de la catégorie géologique.

Elle contraint l'attraction terrestre à s'exercer, dans des conditions très artificielles, sur une masse préalablement définie et constitue en réalité une reproduction du phénomène naturel d'attraction entre la terre et tous les corps pesants.

C'est un autre physicien anglais, William Thompson, qui imite, dans son laboratoire, le phénomène du refroidissement spontané du globe et qui en tire des conséquences absolument géologiques sur la formation et sur la vitesse d'épaississement de la coque planétaire. D'après son estimation, la durée du refroidissement serait de 1 degré en quatre millions d'années, et si on réfléchit à la dimension de ce chiffre on doit en conclure la véritable incommensurabilité des durées planétaires et des durées humaines.

Et puisque nous en sommes à la chaleur, quelle place ne faut-il pas faire aux expériences du physicien

Tyndall sur la congélation de l'eau d'où se dégage toute une théorie de la progression des glaciers ?

Les chimistes sont encore bien plus nombreux que les physiciens. Déjà le vieux Lemery, à la fin du XVIIe siècle (son *Cours* est de 1675) prétend faire servir une expérience de chimie à la solution du problème des volcans.

Il fait un mélange à poids égaux de fer en limaille et de soufre en fleur réduit en pâte au moyen de l'eau, et constate qu'il s'échauffe et dégage de la vapeur d'eau, puis se soulève en se craquelant. Série d'effets dans lesquels l'auteur voit la reproduction de l'éruption du Vésuve et du mont Etna, et celle des tremblements de terre qui l'accompagnent « trop souvent ».

Il insiste sur la trouvaille dans les régions volcaniques de matières analogues, au moins pour l'aspect, à celles qu'il met en œuvre.

Bref, avec les moyens dont il dispose, il fait de la vraie Géologie expérimentale, et le fait mérite d'être expressément constaté, malgré l'impossibilité d'appliquer le résultat obtenu à l'explication du phénomène naturel.

Si l'expérience sur les volcans est surtout fameuse, il ne faut pas oublier d'ajouter que dans d'autres chapitres Lemery a également laissé voir son souci d'éclairer par la chimie les phénomènes de l'économie terrestre.

« La chymie, dit-il, nous enseigne comment les eaux vitrioliques et métalliques se coagulent dans les entrailles de la terre, et font les minéraux, les métaux

et les pierres selon les diverses matrices qu'elles rencontrent. »

Depuis Lemery, bien des chimistes ont montré que des expériences réalisées par eux ont des applications probables à l'histoire de la Terre : on n'en mentionnera ici que quelques-unes spécialement fécondes en résultats.

Gay-Lussac, dans cette catégorie, mérite une place d'honneur. L'expérience qu'il a réalisée est véritablement une tête de ligne de la Géologie expérimentale, qui a donné naissance à des séries très nombreuses de résultats précieux. Elle consiste à faire mutuellement réagir dans un tube de porcelaine chauffé au rouge de la vapeur d'eau et du perchlorure de fer volatilisé. La double décomposition ainsi provoquée consiste dans la formation simultanée de l'acide chlorhydrique qui se dégage et du sesquioxyde de fer qui cristallise avec tous les caractères que présente, dans ses gisements volcaniques, le minéral connu sous le nom de fer oligiste.

Enfin, pour ne pas abuser de la patience du lecteur, je ne mentionnerai plus dans cette direction que les études purement chimiques de M. Schlœsing sur la composition de l'atmosphère : on y trouve des expériences que peut revendiquer pour elle la Géologie expérimentale.

Elles ont trait à la constance si extraordinaire de l'acide carbonique, dont la proportion dans l'air est représentée, partout et toujours, par 3 *dix-millièmes*.

Dans une tout autre direction, je citerai comme

exemple d'expériences géologiques faites par des chimistes, celles que S. Cloëz a réalisées sur les carbures métalliques, à l'aide de dissolvants hydrogénés.

Par exemple, la fonte traitée par l'acide chlorhydrique a donné du chlorure de fer et des carbures d'hydrogène, expérience d'où l'on a récemment tiré, avec le carbure de calcium de production désormais industrielle, la fabrication de l'acétylène si à la mode pour l'éclairage. A notre point de vue, cet ordre de réactions est surtout important en nous donnant la clé de l'origine du pétrole et des bitumes.

Les objections contre la méthode.

Dans un livre intéressant à plusieurs égards, mais dont la tendance générale ne paraît pas en harmonie avec la conclusion des faits observés [1], Charles Sainte-Claire Deville, à la suite, du reste, d'Élie de Beaumont, se déclare adversaire de l'expérimentation géologique (p. 259), et traite les appareils mis en œuvre de *joujoux.*

Ce reproche n'est d'ailleurs qu'une sorte d'appendice à celui que l'auteur fait à la doctrine des Causes actuelles, et c'est l'occasion de répéter que le point de vue expérimental et le point de vue actualiste ont entre eux les liens les plus intimes et les plus solides.

1. *Coup d'œil historique sur la Géologie et les travaux d'Élie de Beaumont*; leçons professées au Collège de France (mai-juillet 1875). Paris, 1878.

Cependant certains esprits moins ouverts qu'on n'eût désiré les voir, ont fait beaucoup d'objections à la légitimité de l'expérimentation géologique.

Leur principal argument est basé sur la différence évidente qu'il faut faire entre la *similitude* en mécanique et la *similitude* en géométrie.

Il est clair qu'une grande machine ne marche pas toujours comme une petite, à cause de la masse même des matériaux qui la composent, et Galilée avait déjà disserté sur ce fait incontestable.

Il est clair aussi que si une action est trop faible pour produire un résultat quelconque on pourra la répéter indéfiniment sans qu'elle produise jamais rien : des zéros ajoutés à des zéros ne feront jamais que zéro.

Mais s'arrêter à ces remarques comme à une fin de non-recevoir, c'est faire preuve d'un *simplisme* évidemment préjudiciable à la recherche de la vérité.

Si, au lieu d'une action nulle, on en suppose une aussi petite qu'on voudra, il sera légitime d'admettre, qu'après une répétition d'efforts suffisants, des effets sensibles seront obtenus.

D'un autre côté, rappelons que la légitimité des imitations synthétiques est démontrée sans réplique par l'identité des conditions attribuée par l'analyse de Laplace à la matière cosmique constitutive du monde, et de celles qui sont réalisées par l'expérience dans la goutte d'huile déposée par Plateau dans le mélange d'eau et d'alcool qui la soustrait à l'action de la pesanteur. Un pareil écart dans les dimensions est de nature à provoquer bien des réflexions.

La principale en ce moment est que ces expériences et leurs analogues ont le caractère très remarquable d'avoir complété les données de l'observation et substitué des certitudes à des hypothèses. Il est même des cas où l'expérience peut aller plus loin et modifier beaucoup le premier point de vue de l'observateur.

A cet égard, je choisirai un exemple emprunté à l'histoire des failles dont la connaissance est fournie d'abord exclusivement par les *observations* faites dans les mines. On peut résumer ce que ce genre d'investigation a procuré en rappelant le texte de la loi de Schmidt et sa conséquence quant à l'influence de la pesanteur. Elle consiste à dire que dans les failles rendues sensibles, par le *rejet* des masses traversées, le *toit* a glissé par rapport au *mur*. Et elle est considérée comme si certaine que mainte fois elle a servi de guide, et avec profit, dans la recherche des couches exploitables, interrompues par les géoclases.

Cependant, quand nous étudierons expérimentalement les cassures du sol, nous verrons que ce qu'on obtient d'habitude ce sont les soi-disant *failles inverses*, contraires à la loi de Schmidt et dans lesquelles le mur semble avoir glissé par rapport au toit. Or, l'étude des montagnes a montré que ce sont là en effet les plus considérables et les plus nombreuses. La pesanteur n'y a pas le même rôle que dans les précédentes. Le point de vue des géologues est changé quant au mécanisme général du faillage.

Je sais bien que nous retombons ici dans un des cas

où l'on a le plus énergiquement opposé les considérations de similitude mécanique à l'institution des expériences.

Mais il se trouve en même temps que c'est un de ceux où l'on a pu montrer que la dimension des objets n'intervient pas.

Il y a des exemples nombreux où les dimensions et les durées n'ont rien à voir avec le caractère général du résultat. Et il en est ainsi pour l'histoire des cassures, où l'on peut constater aisément que les crevasses qui se produisent dans un tas de mortier qui s'affaisse, comme celles qui se déclarent dans un mur sous l'effet d'un tassement du sol, affectent les mêmes dispositions relatives que les joints parfois si prolongés qui s'entre-croisent au travers des strates sur les escarpements des falaises ou le front de taille des carrières.

De même, les refoulements de mastic obtenus par M. Willis, et sur lesquels nous reviendrons, et même les copeaux produits sur une plaque de métal par la machine à raboter, ont rigoureusement certains traits de la structure des grandes chaînes de montagnes et par exemple des Appalaches.

De même encore M. Zurcher[1], qui insiste sur l'identité, au point de vue de la mécanique, des plissements de l'écorce terrestre avec ceux d'une masse de faible épaisseur, même quand celle-ci est réduite à une simple membrane, a été conduit à formuler des lois de plis-

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CXVIII, p. 215, 1894.

sement de l'écorce terrestre, à la suite d'expériences dont l'idée lui fut suggérée par l'allure des plis des étoffes.

Tous ces exemples, et beaucoup d'autres que nous aurons à constater, sont bien faits pour nous engager à persévérer dans la voie expérimentale, et nous pouvons résumer notre programme en rappelant ce passage d'un des mémoires de Claude Bernard :

« Tant que l'observation simple des phénomènes, faite dans les conditions naturelles, est possible, nous la poursuivons. Quand nous l'avons épuisée, nous recourons à des moyens artificiels : nous armons et nous amplifions nos sens à l'aide d'instruments divers pour pénétrer dans l'intérieur des corps, afin d'y observer des phénomènes qui nous sont naturellement cachés; nous ne nous bornons plus à observer des phénomènes tels que la nature nous les offre et en les attendant du hasard, mais nous les provoquons et nous en faisons même apparaître de nouveaux, dans des conditions déterminées dont nous nous rendons maîtres et que nous faisons varier suivant l'idée expérimentale méconnue qui nous dirige. »

Nécessité pour l'expérimentateur de se placer dans des conditions géologiques.

Mais il est indispensable de faire ici une remarque dont l'importance est tout à fait maîtresse.

Pour qu'une expérience mérite la qualification de géologique, c'est-à-dire pour que ses résultats puissent

être considérés comme contribuant à l'élucidation d'un problème concernant le globe terrestre, — il faut de toute nécessité qu'elle soit réalisée dans des conditions conformes à celles que l'observation indique comme ayant été réalisées dans la nature.

Par exemple, Ebelmen, dont les travaux chimiques ont une si grande valeur, et qui a rendu aussi des services si considérables à la Géologie, a produit de l'opale fort ressemblante à celle de la nature, mais en faisant usage de l'éther silicique : ce composé n'ayant pu intervenir dans la production naturelle de l'opale ni aucun composé comparable, l'expérience d'Ebelmen, malgré son intérêt chimique, n'a pas de portée véritablement géologique.

Il en sera de même de cristallisations obtenues au moyen de dissolvants ou de fondants, tels que l'acide tungstique ou le borax, qui n'ont pas pu jouer le rôle qu'on leur attribue, et de bien d'autres expériences.

Et ces remarques, en rendant manifeste le discernement dont l'opérateur doit faire usage pour régler les conditions de ses expériences, justifie dans une certaine mesure les oppositions faites quelquefois à la méthode expérimentale.

C'est ainsi que Fournet, qui a cependant tant fait au profit de la science, n'a pas craint de s'élever, suivant ses expressions : contre l'abus des expériences chimiques en Géologie[1]. Mais il y a là surtout des malentendus faciles à faire disparaître.

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LIII, pp. 82, 607, 673.

Fournet considérait comme un *abus* (c'est le mot dont il se sert) de chercher par l'expérimentation chimique à expliquer l'origine des minéraux.

Il critique beaucoup Senarmont de montrer que le quartz se produit à 500 degrés parce qu'il s'en trouve dans des formations qui manifestement n'ont jamais été chauffées à ce point. Et, en effet, il est incontestable que les silex de la craie et que les couches des caillasses du calcaire grossier, qui présentent d'innombrables géodes de quartz, n'ont jamais subi une température élevée.

Et Fournet renouvelle la critique pour beaucoup d'autres espèces.

Mais la réponse à faire à cette nouvelle catégorie d'oppositions est analogue à celle qui vient à bout de la première : c'est qu'il importe avant tout de n'instituer les expériences que d'après des considérations exclusivement géologiques.

Selon la définition de Chevreul, et avec plus de force que partout ailleurs, l'expérience doit venir à la suite de l'observation pour en contrôler les résultats. Et nous ajouterons : pour les étendre.

Un exemple sera tout à fait décisif à cet égard et suffira pour bien montrer l'ordre de considérations que nous avons en vue.

Les chimistes nous donnent différents moyens de faire cristalliser la silice sous forme de quartz.

M. Hautefeuille, par exemple, nous enseigne que l'acide tungstique en fusion peut, comme fondant, intervenir d'une manière décisive.

Mais, d'un autre côté, Sénarmont nous fait voir que la silice gélatineuse en dissolution, dans l'acide carbonique ou dans l'acide chlorhydrique, cristallise sous forme de quartz quand on la chauffe entre 200 et 300 degrés.

Au point de vue géologique où nous sommes placés, nous n'hésiterons pas à considérer cette seconde méthode comme infiniment plus instructive que l'autre, dont l'application aux phénomènes naturels serait évidemment illégitime, vu la grande rareté de l'acide tungstique opposée à la prodigieuse abondance du quartz.

Ce que Sénarmont a fait avec tant de succès pour le quartz et pour toute une famille de substances sur laquelle nous aurons à revenir, bien d'autres opérateurs l'ont fait pour d'autres directions.

Et l'on ne peut à cet égard se dispenser de citer Gay-Lussac, qui nous a laissé un véritable modèle.

Déjà nous avons mentionné d'un mot sa synthèse du fer oligiste, par la réaction mutuelle du chlorure de fer et de la vapeur d'eau. Mais sur quoi il importe d'insister, c'est la part décisive que l'observation des gisements naturels du minéral à reproduire a eu sur la disposition de l'expérience de synthèse, et l'on ne s'étonne pas que l'idée en soit venue tout entière à l'auteur durant une excursion sur le Vésuve. Sur les flancs du volcan les crevasses tapissées des cristaux d'oligiste, qui avaient provoqué l'attention du sagace observateur, apparaissent comme des soupiraux de dégagement en rapport direct et très proche avec des

pertuis dont la haute température est trahie par leur éclat rouge de feu. Et ces fissures achèvent de révéler les conditions les plus intimes de la genèse de l'oxyde ferrique, en laissant exhaler d'une part des fumerolles où l'analyse retrouve bien aisément de l'acide chlorhydrique mélangé d'un grand excès de vapeur d'eau, et d'autre part du chlorure de fer mélangé souvent à d'autres chlorures métalliques, et dont le dépôt sur les roches y peint des maculatures aussi brillamment que diversement colorées. Pour celui qui a le génie particulier auquel s'adressent les révélations de la nature, le programme de l'expérience est tracé mot à mot : un tube de porcelaine chauffé au rouge sera la crevasse volcanique; le chlorure de fer et la vapeur d'eau seront les corps réagissants; la vapeur d'eau et le fer oligiste cristallisé devront être les produits obtenus.

Aussi quelle hâte ne dut pas tourmenter l'illustre chimiste tant qu'il ne fut pas encore passé de la conception à la réalisation de sa belle expérience! Et quelle satisfaction ne dut-il pas éprouver après sa réussite!

On ne saurait trop insister sur l'identité du produit de Gay-Lussac avec l'oligiste de la nature. La composition, la densité, la forme cristalline, l'éclat et les autres caractères coïncident rigoureusement. Et ce qui achève de faire de cette synthèse un vrai événement de la Géologie expérimentale, c'est qu'elle est prodigieusement féconde et qu'il n'y a eu qu'à la répéter pour calquer sur elle d'autres synthèses importantes.

C'est ainsi que M. Daubrée a produit la cassitérite par le bichlorure d'étain et M. Stanislas Meunier le corindon avec le chlorure d'aluminium.

Nous aurons dans tous les domaines à constater, à diverses reprises, des travaux synthétiques particulièrement satisfaisants en ce qui concerne la conformité des conditions réunies dans les appareils avec celles dont paraît avoir disposé la nature.

Résumé et conclusion. Caractère de la méthode expérimentale.

Il va sans dire que nous développerons les différents chapitres de la Géologie de façons fort différentes, d'après le caractère propre de chacun d'eux, car il en est sur lesquels la méthode expérimentale est plus largement efficace que sur d'autres.

Mais on verra qu'avec des intensités diverses, elle peut s'attaquer à toutes les grandes questions et que, dès aujourd'hui, la révolution expérimentale est accomplie en Géologie. Ce résultat mérite qu'on s'y arrête un instant.

Tous les penseurs qui se sont appliqués à la classification des sciences ont fait, parmi les branches du savoir humain, deux catégories principales :

Les sciences d'observation, purement *contemplatives*, et les sciences expérimentales, ou efficacement *actives*.

Toutefois cette classification paraît ne devoir être que provisoire.

Chevreul proclamait comme une vérité évidente que « les sciences dites d'observation et de raisonnement telles que les sciences naturelles, deviendront plus tard expérimentales ».

« C'est une affaire de temps », ajoutait-il.

Et en effet, déjà bien des branches de l'activité scientifique, telles que la physiologie, la Géologie et jusqu'à l'astronomie dans une série de circonstances, — classées d'abord parmi les sciences d'observation pure, — ont trouvé l'occasion d'appliquer les méthodes propres de l'expérimentation, ces méthodes que Claude Bernard a définies dans des termes qu'il convient de rappeler :

« Tout le génie de l'expérimentateur consistera, dit-il, à déterminer l'apparition d'un fait d'observation dans des conditions où il sera le plus propre à éclairer le problème scientifique dont il cherche la solution. Sous ce rapport, l'esprit d'observation et l'esprit expérimental se rapprochent et se confondent, parce que l'observation et l'expérience se retrouvent dans les deux ordres des sciences, mais dans un ordre différent de subordination[1]. »

Il est juste d'ajouter que l'auteur en écrivant ce passage n'avait aucunement en vue la Géologie, qu'il rangeait même exclusivement, et bien à tort, parmi les sciences de pure observation. — Remarque qui d'ailleurs, même à notre point de vue spécial, ne diminue pas l'importance des caractéristiques rappelées.

1. Claude Bernard, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXVI, 1865-1868.

En tout cas, j'espère montrer, par la série des faits qui vont être exposés dans la suite de ce volume, que la Géologie mérite bien de compter parmi les sciences expérimentales, les sciences qui, selon la belle expression de Claude Bernard, en sont arrivées « à être des *sciences d'action*, c'est-à-dire des *sciences conquérantes de la Nature*[1] ».

1. *Rapports sur les progrès de la Physiologie générale en France*, p. 122. Paris, 1866.

LIVRE PREMIER

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
DES PHÉNOMÈNES D'ORIGINE EXTERNE

PREMIÈRE PARTIE

APPLICATION DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE
A L'ÉTUDE
DES PHÉNOMÈNES DE LA DÉNUDATION

L'observation nous a appris que l'attaque des roches et leur réduction en particules plus ou moins mobiles dont s'empareront les forces sédimentaires, prend suivant les cas des formes extrêmement variées. Souvent le résultat final est très complexe et provient d'une superposition d'effets différents, mais difficiles à distinguer les uns des autres. A cet égard la méthode expérimentale, en permettant de simplifier le problème, a déjà rendu des services incontestables. Pour qu'on en comprenne toute la portée, il convient du reste d'exposer les notions acquises en considérant successivement les différents modes de dénudation,

parfois, cela va sans dire, collaborateurs dans une même région.

Les modes de dénudation sur lesquels nous attacherons notre attention sont les suivants :

1° La dénudation *pluviaire*, réalisée par les eaux météoriques arrivant sur le sol, soit sous forme de pluie, soit sous forme de ruissellements d'eaux sauvages ;

2° La dénudation *fluviaire*, réalisée par les eaux coulant dans un lit et présentant d'ailleurs des allures très variées, depuis celle des torrents jusqu'à celle des ruisseaux, des rivières et des fleuves ;

3° La dénudation *marine* ou *lacustre*, réalisée par des eaux contenues dans un large bassin ;

4° La dénudation *glaciaire*, réalisée par l'eau à l'état solide ;

5° La dénudation *souterraine*, réalisée par l'eau infiltrée dans le sol et circulant soit dans les pores des roches, soit dans des cavités plus ou moins larges ;

6° Enfin, la dénudation *éolienne*, réalisée par le vent, ou air en mouvement.

CHAPITRE PREMIER

La dénudation pluviaire.

Le travail mécanique de la pluie.

Par le fait seul de sa chute, la pluie détermine sur le sol un travail qui se traduit souvent par la désagrégation des roches et le déplacement des particules détachées. C'est ainsi que, sur certaines substances, chaque goutte laisse une dépression, et il est facile d'évaluer la dépense de force que cette empreinte représente.

On trouve, à divers niveaux géologiques, le contremoulage de pareilles empreintes et leur découverte contribue à nous éclairer sur les conditions météorologiques des époques passées. Ces accidents peuvent très aisément être reproduits par l'expérience. Déjà Marcel de Serres en 1832 [1] mettait sous les yeux de l'Académie des sciences un morceau d'argile sur lequel il avait produit des empreintes semblables au moyen

1. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. IV, p. 106.

d'une pluie artificielle. On peut voir dans la collection de Géologie expérimentale du Muséum d'histoire naturelle des spécimens obtenus de la même manière.

En les préparant, M. Stanislas Meunier a pu préciser

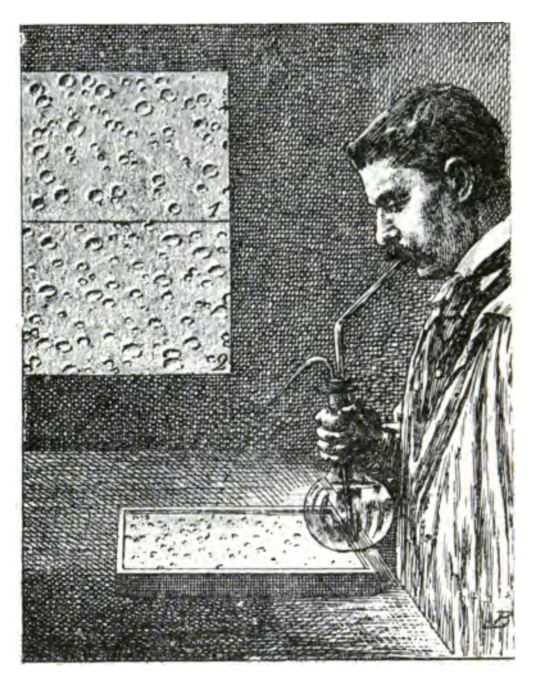


Fig. 1. — Imitation artificielle des empreintes de gouttes de pluie. N° 1, moulage de gouttes tombant verticalement ; n° 2, moulage de gouttes lancées obliquement.

les causes des déformations fréquentes des gouttes de pluie géologiques. Dans les cas les plus fréquents, ces déformations tiennent à l'obliquité sous laquelle le petit sphérule d'eau est venu frapper la matière plastique. Des gouttes lancées obliquement par exemple par une disposition indiquée dans la fig. 1 ci-dessus, donnent des détails tout à fait semblables. Il en résulte

que les empreintes elliptiques peuvent être regardées comme représentant des *coups de vent fossiles*. On voit dans la figure des types divers de dépressions obtenues soit isolées, soit groupées de diverses manières,

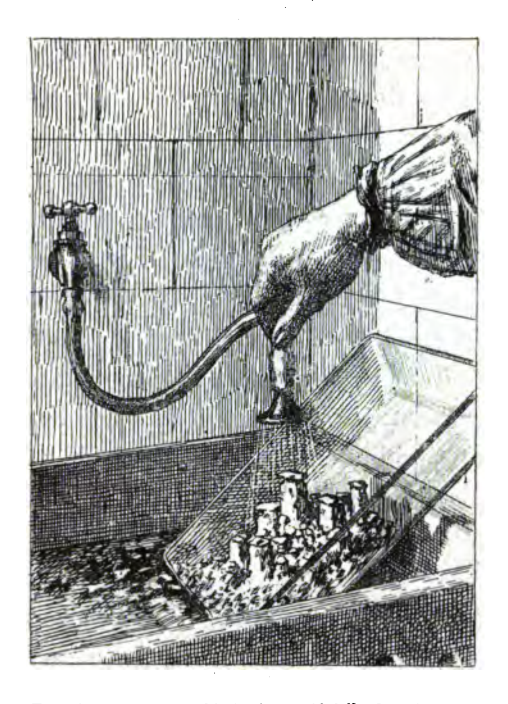


Fig. 2. — Expérience procréant l'imitation artificielle des cheminées des fées.

réalisées dans la nature. Un point intéressant à noter, c'est qu'on obtient des dépressions très nettes même quand l'argile ramollie est recouverte de plusieurs millimètres d'eau. Les dépressions obtenues ont alors des caractères spéciaux qui pourront préciser les observations sur les gouttes de pluie paléontologiques.

Des expériences spéciales ont été disposées pour

étudier la faculté de transport des eaux pluviaires, c'est-à-dire tombant sur le sol, et abstraction faite de ce qui peut concerner leur ruissellement sous la forme d'eaux sauvages.

L'appareil adopté ici par M. Stanislas Meunier n'est autre que la « pomme » de l'arrosoir ordinaire des jardiniers, dont les trous ont le diamètre et l'écartement convenables (fig. 2).

Si on fait tomber une pluie factice sur un mélange de particules diverses par la taille, par la forme ou par le poids, on voit tout de suite que chaque catégorie éprouve des effets différents. Les petits grains légers sont emportés les premiers et les plus lourds résistent le mieux. Les éclats rocheux plats, disposés horizontalement, jouant le rôle de parapluie, se constituent très rapidement en chapiteaux de petits pilastres ayant avec les « cheminées des fées » les analogies de forme les plus complètes [1].

L'étude de ces petits spécimens (fig. 3), si simples qu'il pourrait paraître superflu de les préparer, a un grand intérêt au point de vue de l'idée qu'il convient d'adopter quant au mécanisme de la dénudation subaérienne, et, comme on le verra bientôt, en ce qui concerne le grand phénomène du creusement des vallées. C'est à ce point de vue surtout qu'il convient de constater que les cheminées des fées ne peuvent résulter

1. En mélangeant d'une certaine quantité de plâtre en poudre la matière caillouteuse sur laquelle on opère, on obtient des spécimens qui se conservent facilement. On en verra de ce genre dans la Collection de Géologie expérimentale exposée au Museum d'histoire naturelle : ils ressemblent à des miniatures des accidents naturels.

que de pluies peu écartées de la verticale et qu'elles ne sauraient subsister que là où les eaux de ruissellement ne sont pas trop abondantes. Le moindre courant transversal d'eau les désagrège et les détruit : leur

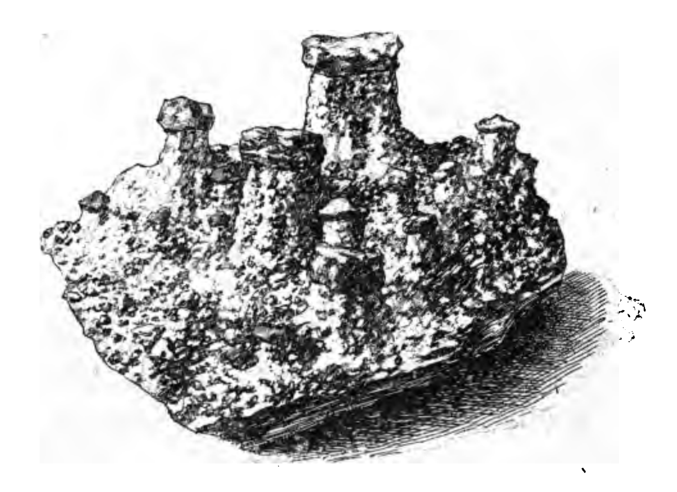


Fig. 3. — Cheminées des fées obtenues artificiellement. 1/3 de la grandeur naturelle.

présence sur les flancs d'une série de vallons dans les pays de montagnes, comme à Saint-Gervais de la Haute-Savoie, à Ritton près de Bautzen, sur le Finsterbach, aux États-Unis, sur le Zuni-Plateau, Nouveau-Mexique, où M. Dutton les a étudiées[1], montre avec évidence que, contrairement à l'opinion émise souvent, les vallées ne sont pas l'œuvre de torrents ou de forts courants d'eau. Elles sont le produit d'une sorte de ciselure très délicate de la surface du sol par des eaux incapables du transport horizontal de masses un

1. *Sixth Annual Report of the geological survey of United States*, p. 152 et suiv. (1884-1885).

peu considérables, et l'on verra bientôt les conséquences importantes de ces conclusions de l'expérience.

L'utilité de l'expérimentation apparaît ici par la précision jetée sur les conditions du phénomène. Tout ce qui concerne la constitution du terrain désagrégeable est désormais défini, et surtout ce qui a trait à la forme du sol le plus favorable. Sur une surface horizontale ou presque horizontale l'effet est nul à cause du séjour de l'eau au pied des pilastres de terre; sur un terrain trop incliné, les pyramides ne peuvent persister à raison de la grande vitesse des filets d'eau sauvage. Il faut un terme moyen, et la pente d'éboulement des matériaux meubles de 35° à 40° paraît la meilleure. Il résulte de là aussi la notion d'une période, dans le creusement des vallées, où la production des piliers de terre peut se déclarer et que, par conséquent, elle caractérise.

Aussi, dans la plupart des cas, ne constitue-t-on pas de cheminée des fées par l'arrosage du sol hétérogène. Si les blocs contenus ne sont pas plats et si la pluie se fait obliquement, ou si (ce qui est très fréquent) le sol n'a pas la cohésion nécessaire, les blocs sont déchaussés et ils descendent verticalement pendant que les particules fines sont tout doucement emportées par les eaux de ruissellement.

Quand on a suivi pas à pas, comme l'a fait M. Stanislas Meunier, l'effet de cette espèce de lavage vertical, on en voit jaillir l'explication d'une foule de phénomènes qui ont souvent été mal compris, et par

exemple celle de la présence de certains blocs rocheux, parfois très volumineux, sur un terrain qui contraste avec eux à tous les points de vue. Un exemple remarquable en a été procuré récemment dans Paris par la découverte, dans le diluvium de la rue Lacépède, de gros blocs de grès faciles à identifier avec la pierre à paver exploitée à Orsay et à Fontainebleau et qui dépend des formations oligocènes. M. le Dr Capitan en a donné un beau spécimen au Muséum. L'étude des lieux, éclairée par la notion que nous venons d'acquérir, démontre que ces blocs, durant les progrès de la dénudation pluviaire, ont dû descendre verticalement de 75 mètres environ, correspondant à l'ablation, lente et très progressive, de toute la formation des sables supérieurs, puis de celle des marnes du terrain de gypse, du travertin de Saint-Ouen et d'une partie des sables de Beauchamp.

Le travail chimique de la pluie.

Mais il est très important d'ajouter que l'action purement mécanique de la pluie est souvent secondée par une action chimique. Il y a des roches solubles dans l'eau pure comme le sel gemme, qui affleure à Salies de Béarn, et le gypse mis à découvert à Romainville et dans bien d'autres localités des environs de Paris. Rien n'est plus facile (fig. 4) que d'imiter artificiellement ces formes intéressantes à cause de leur analogie avec les profils présentés par des masses qui, résistant à l'eau pure, sont attaquées par d'autres réactifs.

Dans le nombre figure d'une façon tout à fait prépondérante l'acide carbonique, si normalement dissous dans l'eau de pluie et dans l'eau de lavage du sol

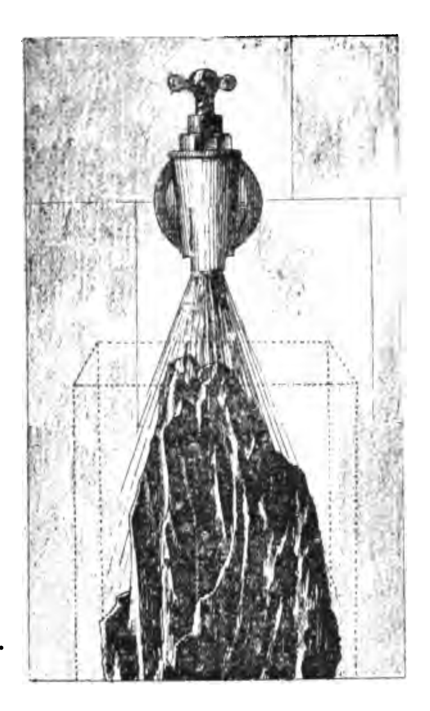


Fig. 4. — Corrosion par l'eau d'un bloc de sel gemme. Les lignes pointillées représentent le contour initial.

arable. Des expériences directes font voir que beaucoup de minéraux sont solubles en tout ou en partie dans l'acide carbonique : le type est le calcaire, comme nous le verrons un peu plus loin; mais des composés divers doivent figurer à côté de lui et par exemple des silicates de la nature des feldspaths. M. Stanislas Meunier a abandonné dans une solution aqueuse

d'acide carbonique, semblable, sauf pour la pression qui était bien moindre, à de l'eau de Seltz, la poussière d'un certain nombre de silicates, et il a constaté qu'à froid, au bout de temps d'ailleurs fort variables, le liquide se charge de bases diverses et spécialement de soude et de chaux, de potasse dans certains cas. C'est là un des phénomènes les plus importants de la physiologie superficielle du globe, et Ebelmen y a rattaché la cause de la production des argiles aux dépens des roches feldspathiques[1]; la cause par conséquent de l'attaque si fréquente des granits et de leur recouvrement par les détritus connus sous le nom d'arênes.

A cet égard, il est de notre programme de rappeler les véritables expériences accidentelles qui prennent naissance sur les façades des monuments construits en matériaux feldspathiques, et d'où l'on peut conclure d'une façon plus ou moins approchée, la rapidité de l'attaque. C'est un fait sur lequel A.-C. Becquerel a appelé l'attention à propos de la cathédrale de Limoges, construite en blocs de granit dont on sait exactement la provenance et le temps d'exposition aux intempéries[2]. L'épaisseur de la pellicule attaquée après cinquante ans, variant suivant les points de 7 à 9 millimètres, l'auteur a tenté de convertir ce résultat en une donnée applicable à l'histoire des substances kaoliniques qui accompagnent la roche intacte dans

1. Ebelmen, *Annales des mines*, 4e série, t. VII, p. 1, 1885. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XX, p. 1415, 184.
2. *Bulletin de la Société des sciences naturelles* du 20 décembre 1833 à janvier 1835, n° 1, p. 4.

sa carrière d'origine. Une simple règle de trois l'a conduit à supposer que la masse visible, de 1 m. 62 d'épaisseur, représente une période d'attaque de sept mille cinq cents ans de durée. Cette conclusion a soulevé beaucoup d'objections, et spécialement de la part de d'Archiac. Nous savons d'ailleurs que le kaolin proprement dit dérive d'une tout autre origine et provient d'une activité chimique émanant des régions profondes de la terre. C'est un sujet sur lequel nous reviendrons plus loin.

Mais c'est aux dépens du calcaire que l'activité chimique de la pluie s'exerce sur la plus grande échelle. Il est remarquable que les formes produites quand la roche est bien homogène coïncident exactement avec celles que nous mentionnions tout à l'heure pour les roches solubles dans l'eau, sel gemme et gypse. Ainsi on recueille sur maints sommets calcaires des Pyrénées, des Alpes et d'autres chaînes, des blocs présentant des sillons identiques à ceux des masses précédentes. M. Stanislas Meunier en a déposé au Muséum qu'il a recueillis au sommet de la Sulzfluhe dans le Vorarlberg et qui sont des plus remarquables à cet égard. L'expérience en a donné à l'auteur des reproductions rigoureuses, pour l'obtention desquelles on peut, pour plus de commodité, remplacer l'acide carbonique par un autre acide très étendu.

Quand les roches calcaires renferment des minéraux non attaquables par l'acide carbonique, la dénudation pluviaire a pour effet de les dégager et parfois même de les libérer complètement de leur gangue.

Dans bien des pays, des moellons de craie à silex montrent en saillies, après quelques années, les rognons qu'ils contenaient et on en a comme exemple les murs de la cathédrale de Beauvais, où une espèce d'expérience accidentelle vient reproduire le fait si remarquable des calcaires grenatifères du pic d'Eridlitz dans les Pyrénées.



Fig. 5. — Saillie de grains de sable à la surface d'un calcaire attaqué.

L'expérience rationnelle (fig. 5) imite aussi ces conditions : l'attaque, par un acide très étendu, d'une surface calcaire cristallifère ou arénifère amène la saillie progressive des minéraux insolubles qui y sont inclus.

Ces grains, peu à peu, se détachent et font au pied du bloc calcaire un sable tout pareil à celui que la dénudation pluviaire détermine dans une série de localités.

Le fait se reproduit presque sans variante pour des grès à ciment calcaire qui prennent, sous l'action chimique de l'eau acidulée, la condition arénacée et sont alors tout préparés à subir les effets de la dénudation pluviaire mécanique.

A l'action démolissante de la pluie, se rattache très directement un important phénomène connu sous le nom de *rubéfaction*, qui d'abord a été bien mal compris, et que l'expérience est venue éclairer d'un jour très vif. Pour le comprendre il faut rappeler en peu de mots de quoi il est question. Depuis longtemps, on avait remarqué que des terrains de couleur bleuâtre ou verdâtre plus ou moins foncée sont recouverts par des couches jaunes ou rougeâtres et parfois même très rouges. C'est ainsi que dans le terrain jurassique de la Franche-Comté, les strates oxfordiennes bleues sont couronnées par le niveau des chailles qui est jaune, les faluns jaunes, dans le Bordelais, recouvrent les faluns bleus, le pliocène jaune recouvre le pliocène bleu, le diluvium rouge recouvre le diluvium gris, et, dans des formations tout à fait différentes, les terres jaunes diamantifères du Cap (*yellow ground*) sont superposées aux terres bleues (*blue ground*) dans les pans. On peut, malgré la différence apparente, rattacher à cette même série, des cas de superposition de couches rougeâtres à des formations tout à fait blanches, et avant tout, à cause de son intérêt pratique, la terre végétale ocreuse qui recouvre des calcaires d'aspect normal. On en aura des exemples, à chaque pas, dans les zones jurassiques ou infracrétacées de la Lorraine, de la Côte d'Or, du Jura, des Causses de l'Aveyron, de la Lozère, de l'Hérault; dans le Quercy, dans l'Hérault, dans le Karst où la pierre blanche a un manteau de *terra rossa*, dans l'Oxfordshire où la terre rouge superficielle des cal-

caires de l'olithe inférieure a été qualifiée, à cause de sa fertilité, de *gloire du Comté*[1], etc.

L'expérience a démontré que la cause de cette association si fréquente réside dans la peroxydation du fer, contenu au minimum dans les roches, sous l'influence de l'eau aérée qui résulte de la pluie. M. Stanislas Meunier, qui s'est occupé longuement de ce sujet, a traité spécialement un cas parfaitement défini : c'est celui où les roches soumises à la dénudation pluviaire contiennent du sulfure de fer ou pyrite, cas extrêmement fréquent dans la nature.

Un premier fait bien constaté, c'est que si on place de la pyrite blanche sur un fragment de calcaire et qu'on abandonne le tout à l'action de l'air humide et de la pluie, le calcaire ne tarde pas à se colorer d'une nuance ocracée de plus en plus sensible.

Il s'est produit au Muséum un fait inopiné qui peut être regardé, à cet égard, comme une expérience accidentelle et qui montrera l'efficacité de la pyrite comme agent de corrosion et de rubéfaction des roches calcaires[2].

A la suite de l'Exposition universelle de 1867 notre grande collection nationale a reçu du gouvernement du Portugal un énorme échantillon de pyrite provenant du filon de San Domingo et qui montrait, sur 1 m. 60 de hauteur, un magnifique miroir de frottement. A cause de ses dimensions et de son poids, le bloc fut

1. Clare Sewel Read; *Journal of the royal Society of agriculture*, t. XV.
2. Nous l'avons déjà décrit en 1879. (Voyez l'ouvrage intitulé : *les Causes actuelles en Géologie*, p. 298.)

laissé en dehors de la galerie et établi sur un banc de calcaire à la discrétion de la pluie et des autres intempéries (fig. 6). Au bout de peu d'années, le banc calcaire se montra profondément corrodé et teint d'une nuance ocracée de plus en plus foncée.

On peut analyser facilement la réaction : le sulfure devient sulfate, et celui-ci, au contact du calcaire, devient gypse pendant que l'oxyde est mis en liberté; — le carbonate d'abord formé n'ayant aucune stabilité.

M. Stanislas Meunier a répété cette expérience en la variant de beaucoup de façons, et il est remarquable que la rubéfaction peut se faire expérimentalement avec des roches très peu ferrifères, de façon à imiter le phénomène de la nature.

Ainsi du calcaire grossier parisien (région moyenne ou à millioles), pierre presque blanche, soumis à l'action dénudatrice d'une eau acide, se rubéfie au contact de l'air.

C'est aussi par le procédé expérimental que M. Stanislas Meunier s'est assuré que la pyrite n'est pas le seul sulfure capable d'intervenir efficacement dans le travail chimique de la dénudation pluviaire.

L'oxydation spontanée de beaucoup de minerais sulfurés sous l'influence de l'eau pluviale, toujours aérée, donne naissance à des solutions métalliques généralement très énergiques à l'égard des masses calcaires sur lesquelles elles peuvent s'écouler. Il en résulte que les affleurements de ces gîtes métallifères ont généralement subi une dénudation particulière et qui se signale par une série de caractères sur lesquels

nous aurons à revenir à propos des phénomènes sédimentaires. Ce qu'il importe de dire ici, c'est que les

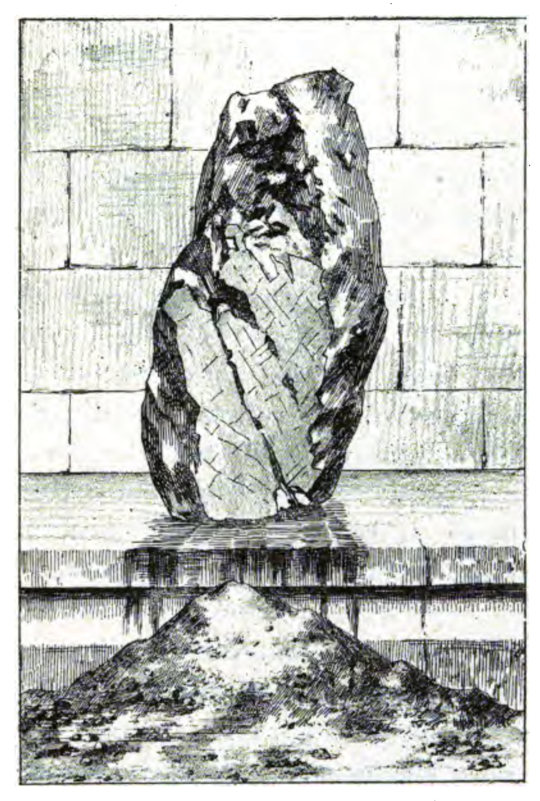


Fig. 6. — Érosion du calcaire par le produit d'oxydation de la pyrite. Bloc de pyrite de 1 m. 60 de hauteur placé à l'air sur un socle calcaire, au Muséum d'histoire naturelle.

chapeaux des filons sulfurés sont normalement complètement dépouillés de calcaire.

Remarquons maintenant que l'action dénudatrice des eaux météoriques trouve parfois un collaborateur efficace dans des énergies d'ordre biologique. Outre que les microbes interviennent efficacement dans un

grand nombre de cas de décomposition de roches, la décoloration des limons ferrugineux par les racines vivantes, grâce à l'acide crénique qui s'en dégage, constitue comme une contre-partie exacte de la *rubéfaction* précédemment mentionnée.

Et l'on peut remarquer à cette occasion qu'il ne serait pas impossible de débarrasser un sol donné de la plus grande partie de son fer à l'aide d'une culture suffisamment active.

Mais le point sur lequel nous devons insister spécialement, c'est que cet ordre de phénomènes a été étudié expérimentalement de la manière la plus instructive par J. Sachs. Des graines ayant été mises à germer sur une plaque de marbre blanc parfaitement polie, on a vu les racines laisser la trace de leur empreinte sur la roche calcaire et manifester ainsi l'énergie dissolvante des principes qu'elles laissent exsuder.

Ces expériences, qui ont été variées de diverses façons, expliquent la perforation que M. Stanislas Meunier a naguère signalée[1] de certains grès à ciment calcaire par des racines d'arbres actuels; et leur portée s'augmentera encore à nos yeux quand nous aurons constaté qu'elles éclairent l'origine même de la terre végétale. Celle-ci reçoit une active contribution des cryptogames poussant sur des roches variées.

Certaines algues poussent sur le calcaire : l'*Euactis calcivora* s'établit sur les galets calcaires du lac de

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 11 octobre 1875.

Neuchâtel et, malgré ses faibles dimensions de $\frac{1}{75}$ de millimètre, décompose et désagrège d'énormes quantités de matière minérale. C'est ce que de leur côté réalisent maints lichens sur les roches feldspathiques.

Le rôle des eaux sauvages.

Que l'action dénudatrice de la pluie et des eaux sauvages soit purement mécanique ou purement chimique ou simultanément mécanique et chimique, — dans tous les cas, elle se traduit au bout d'un temps plus ou moins long par la production à la surface du sol de sillons, dont l'examen nous préparera à l'étude des effets de la dénudation réalisée par les eaux courantes.

De vraies expériences accidentelles sont à cet égard pleines d'enseignements, et on peut citer par exemple celles qui résultent de l'exposition à la pluie de talus et de tranchées, construits dans des terrains sableux.

Dans des cas de ce genre, on ne manque pas de constater, et la remarque est d'une importance capitale par ses conséquences, que l'action des eaux sauvages qui ruissellent sur le sol à la suite de la pluie ne saurait être uniforme dans les différents points.

La moindre particularité locale détermine des inégalités qui sont immédiatement la cause de la substitution de filets aqueux à la nappe théorique.

De semblables observations, en somme très accidentelles, peuvent être avantageusement remplacées, par des expériences réalisables d'une façon tout à fait systématique dans le plus agréable laboratoire qu'on

puisse imaginer, par une belle matinée d'été ou d'automne : une vaste plage sableuse d'où la mer vient de se retirer.

C'est à Saint-Lunaire (Ille-et-Vilaine) que M. Stanislas Meunier a opéré.

Dans une semblable localité, l'opérateur dispose d'une nappe de sable étalée uniformément et d'où sort bien uniformément aussi, l'eau dont sa submersion sous la mer l'avait pourvu. Pourtant la nappe d'eau qui retourne à la mer et qui peut être comparée à la nappe que la pluie y aurait étendue, est à chaque pas modifiée par des ruissellements. Aux causes déjà indiquées comme déterminant les inégalités locales il faut ajouter ici l'émergence de pointements rocheux capricieusement distribués.

Quoi qu'il en soit, les filets produits se prêtent merveilleusement à des modifications volontairement déterminées dans leur volume, ou dans leur vitesse, ou dans leur direction.

En outre, on peut souvent conserver les résultats des expériences par des *moulages* avec du plâtre de Paris, qui gâché dans de l'eau douce et versé sur le sable salé se *prend* avec une rapidité bien éloquente en faveur de l'énergie des phénomènes osmotiques.

Le seul point qu'il faille ici retenir, c'est que la circulation de ces petits filets d'eau, soit sur les tranchées ou les talus, soit sur les plages sableuses, donne rapidement, à une surface primitivement plane, des accidents de forme qui, à la dimension près, sont identiques à ceux qui caractérisent le modelé du sol.

Il résulte de là une forte présomption que ce modelé peut très souvent être l'œuvre exclusive de l'activité externe.

C'est comme application du même fait qu'il faut remarquer que la pluie a pour effet d'adoucir progressivement les pentes des coteaux. L'ablation ne se fait pas parallèlement au flanc actuel, mais avec une inclinaison plus forte sur l'horizon. MM. de La Noë et de Margerie ont fait à ce sujet des expériences pleines d'intérêt[1].

C'est une application aussi des mêmes considérations qu'on peut faire à la forme du flanc des coteaux hétérogènes, laquelle reflète naturellement l'inégale facilité offerte par chaque formation géologique à la dénudation météorique.

Les auteurs que nous venons de citer ont imité ces faits par une expérience aussi simple qu'ingénieuse : sur une planchette on dispose des couches alternatives de plâtre à mouler et de sable fin, dépassant d'ailleurs les bords de la planchette déposée d'abord sur une table. Quand les lits très minces de ces deux poussières épandues au tamis sont assez nombreuses, on soulève lentement la planchette verticalement et sans l'incliner, de façon à séparer ce qui la recouvrait de la matière qui l'entourait. La tranche de chacune des couches prend alors un profil en rapport avec sa faculté spéciale d'éboulement. Le plâtre reste presque vertical, le sable s'incline beaucoup et le tout res-

1. *Les formes du terrain*, p. 21.

semble intimement au profil des flancs de coteaux précédents.

Il n'est pas inutile de remarquer que la dénudation météorique a pour résultat fréquent d'arrondir les formes, et de supprimer les angles, et comme ce résultat est indépendant de la dimension des masses considérées, un des effets de ce mode de dénudation est d'amener, à l'aide d'éclats anguleux, la production de vrais galets sans charriage.

Dès 1872, M. Stanislas Meunier a signalé[1] l'existence à Coye (Oise), noyés dans la terre végétale, de blocs tout à fait arrondis, parfois ovoïdes, qu'on prendrait pour des galets ordinaires si l'on ne voyait à leur surface des *Nummulites* faire saillie de toute part. La présence de ces fossiles doit faire écarter toute idée de friction comme procédé d'arrondissement des pierres, et la conséquence c'est que des roches peuvent s'arrondir sans avoir été roulées. Chacun de ces pseudo-galets n'est autre chose que le résidu de la dissolution, en voie d'accomplissement, d'un bloc, d'abord anguleux, soumis à l'action corrosive et mécanique en même temps des eaux superficielles. Cette corrosion est bien plus active sur les angles et sur les arêtes que sur les larges surfaces, et c'est ainsi que toutes les aspérités disparaissent et que le cube se fait sphère.

L'auteur a reproduit expérimentalement les conditions de cette formation et la figure 7 ci-jointe met sous

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXV, p. 890.

les yeux le profil d'un éclat de calcaire et à côté la forme du résidu obtenu par l'attaque de cet éclat au moyen d'eau faiblement acidulée.

Cette circonstance devant se reproduire avec toutes

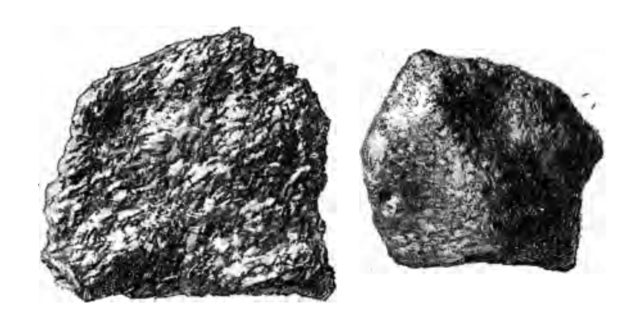


Fig. 7. — Arrondissement par corrosion des angles d'un fragment de calcaire attaqué par l'eau acidulée.

roches, il y a lieu de faire attention avant de conclure des formes arrondies à un charriage. C'est ainsi que les galets de granit des alentours de Paris peuvent ne pas devoir leurs contours arrondis au charriage, mais seulement à l'émoussement pluviaire.

On peut, du même fait, tirer des applications nombreuses, par exemple au cordon de meulières qui couronne le sable de Fontainebleau, remanié sur place, des Hautes-Bruyères et de beaucoup d'autres localités.

On pourrait croire à une espèce de diluvium : l'expérience conduit à penser qu'il s'agit d'un résidu lentement descendu, comme nous avons vu qu'est descendu le bloc du Panthéon et émoussé, comme celui-ci d'ailleurs.

En résumé, les faits expérimentaux réunis dans ce

chapitre suffisent à montrer l'énergie des phénomènes de la dénudation pluviaire. Sans doute, à leur spectacle, on s'étonne qu'on les ait méconnus si longtemps et qu'Élie de Beaumont, par exemple, se basant sur la persistance, depuis le temps très rapproché qui nous sépare de leur érection, de certains tumuli, soit allé jusqu'à en contester la réalité[1]. C'est un des exemples de l'inexactitude du point de vue des personnes qui se refusent à adopter le principe actualiste.

1. *Leçons de géologie pratique*, t. I, p. 155 à 159.

CHAPITRE II

La dénudation fluviaire.

Comme nous l'avons fait pressentir il n'y a qu'un moment, la dénudation fluviaire se rattache de la façon la plus intime aux phénomènes qui viennent de nous occuper. Son étude expérimentale a une importance exceptionnelle à cause des applications directes dont elle est susceptible à l'histoire du creusement des vallées et, par conséquent, à celle du modelé de la surface terrestre.

Nous avons vu déjà comment on peut instituer commodément sur certaines plaques sableuses, durant les basses marées, des expériences très instructives. C'est ce que M. Stanislas Meunier a fait à Saint-Lunaire, en modifiant, par des excavations ou à l'aide des planchettes, les filets d'eau qui se réunissent et sont appelés par le reflux; c'est ce qu'on peut faire aussi dans le laboratoire par divers procédés et à l'aide de divers appareils que nous allons énumérer.

Pour tirer de cette étude expérimentale tout le fruit

qu'elle est capable de donner, nous la diviserons très avantageusement en deux paragraphes, concernant l'un le travail vertical et le second le travail horizontal des cours d'eau. Il n'y aura plus qu'à les combiner ensemble pour avoir la notion complète du travail total réalisé.

Le travail vertical des cours d'eau.

Quand un cours d'eau, par suite de la forme du terrain, est empêché de divaguer à droite et à gauche en méandres; quand, par exemple, il est dirigé par une cassure, rectiligne ou non, au fond de laquelle il est retenu, — toute son action dénudatrice se traduit par une usure verticale du sol, d'autant plus active que le courant est plus rapide et qu'il charrie plus de matériaux pierreux.

On peut assister véritablement aux progrès de ce travail spécial, comme M. Stanislas Meunier l'a fait remarquer, en portant successivement son attention sur des gorges convenablement choisies dans les pays montagneux. C'est ainsi que le Staubach, dans le canton de Berne, où la rivière tombe verticalement d'une hauteur de 300 mètres, peut être considéré comme une première étape dans le travail de sciage entrepris par le cours d'eau aux dépens de la roche sur laquelle il coule. Le filet d'eau peut être exactement comparé au fil métallique dont se sert le lapidaire pour couper un bloc en deux morceaux, et il en résulte que cette opération industrielle devient une

vraie expérience géologique. On sait que ce n'est pas plus le fil métallique que le cours d'eau qui scie directement la roche, mais bien les particules diverses qu'ils charrient l'un et l'autre : l'émeri chez l'ouvrier, les graviers de tous genres dans la nature. Des deux côtés on les retrouve accumulés au dehors du point travaillé : en tas sous l'établi, en cône de déjection sous la chute d'eau.

La célèbre cascade de Pissevache, dans la vallée du Rhône, peut nous procurer un degré plus avancé du travail et la Salanfe est dès maintenant parvenue à scier, sur un bon tiers de sa hauteur, l'escarpement du haut duquel elle tombait originairement, comme le Staubach le fait encore aujourd'hui.

Enfin, à peu de distance au-dessus de Pissevache et également sur la rive gauche du Rhône, à Vernayaz dans le canton du Valais, on rencontre les gorges de Trient, qui nous montrent la section complètement terminée.

L'examen des parois de ces gorges fait voir, à toutes les hauteurs, les étapes du torrent dans son travail de section, et cependant il y a eu des observateurs assez naïfs pour émettre l'opinion que, dans le passé, les cours d'eau avaient eu le même fonds qu'aujourd'hui et, par conséquent, toute la profondeur mesurée par la distance qui sépare leur thalweg actuel des plus hautes traces laissées par eux sur les parois rocheuses. On ne saurait qualifier trop sévèrement ce procédé enfantin de raisonnement qui a fait le plus grand mal à la science en retardant la diffusion des idées justes.

Pour étudier expérimentalement le travail de dénudation verticale des rivières, M. Stanislas Meunier a adopté souvent un dispositif qui consiste dans l'emploi d'un filet d'eau acidulée agissant sur une dalle de roche calcaire convenablement inclinée.

On s'assure que, malgré le caractère chimique de la réaction, le résultat est de tous points comparable au phénomène naturel; on emploie avec avantage un calcaire sableux; les grains quartzeux libérés et entraînés ajoutent leur action mécanique à l'action chimique de l'acide.

On arrive ainsi à reproduire toutes les particularités de formes offertes par les parois des gorges ou canions. Avec des roches hétérogènes comme des calcaires bréchoïdes ou des grès et poudingues à ciment calcaire abondants on a souvent des parois flexueuses, comme sont celles de la célèbre gorge de la Tamina dans le canton des Grisons.

Rappelons d'ailleurs que les expériences sur les filets ruisselants des plages marines sableuses, viennent compléter de la façon la plus décisive les expériences par corrosion, et nous allons avoir à y revenir pour plusieurs points d'un intérêt considérable.

Nous venons de voir que les cours d'eau de toutes dimensions, pourvu qu'ils soient assez rapides pour charrier des débris rocheux *même très fins*, sont au propre des agents de section verticale du sol qui les supporte, et qu'ils arrivent avec le temps à creuser des sillons beaucoup plus profonds qu'eux-mêmes : un vrai *sciage* de montagnes entières. Il faut ajouter

que, comme contre-coup, l'usure verticale du sol par les cours d'eau détermine, entre autres accidents, et comme résidus nécessaires, la production de débris de différentes grosseurs.

On en distingue trois types principaux sous les noms de *galets*, de *sables* et de *limons*.

La formation des galets, des sables et des limons peut être citée comme un exemple particulièrement net des services que la méthode expérimentale est de nature à rendre aux études géologiques.

Partout on foule ces matériaux et on assiste aisément à leur production dans le lit des torrents et des rivières, comme sur le littoral de la mer. Et cependant, comme M. Daubrée l'avait remarqué, les conditions intimes et vraiment intéressantes du phénomène nous échappent nécessairement.

On ne peut constater comment et avec quelle rapidité les fragments rocheux changent de forme et diminuent de volume sous l'influence des frottements et des chocs.

Il est d'ailleurs souvent impossible de les distinguer de ceux que l'eau n'a fait que déplacer et qui avaient été triturés à une époque antérieure.

L'appareil le plus commode et le plus simple, employé par plusieurs auteurs déjà, est représenté fig. 8. Il consiste en pots de grès disposés autour d'un axe de rotation et contenant, avec de l'eau, des fragments de roches à l'étude. Un volant recevant une courroie de transmission permet de produire une vitesse variant de 0 m. 80 à 1 mètre par seconde.

On constate qu'après un trajet de 25 kilomètres, les fragments anguleux de toutes les roches sont réduits en galets impossibles à distinguer de ceux de la nature.

Dans les 25 premiers kilomètres de parcours, les

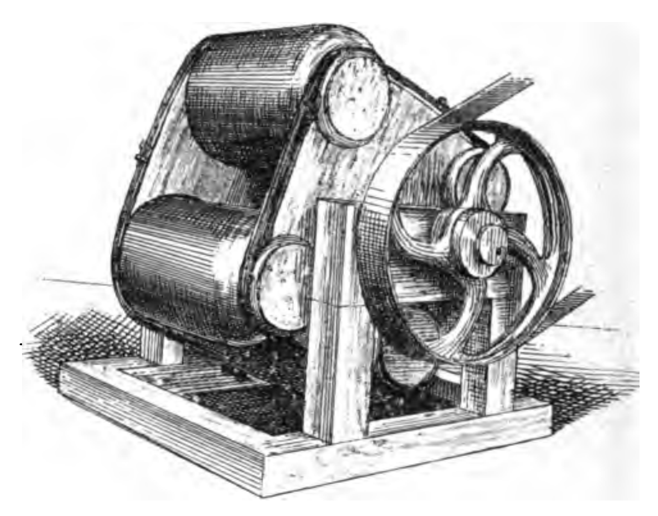


Fig. 8. — Appareil destiné à l'étude expérimentale des galets, des sables et des limons.

fragments anguleux de granit devenus galets ont perdu les $\frac{4}{10}$ de leur poids. Ce qui correspond à $\frac{1}{62}$ par kilomètre (ou 0.016).

Une fois arrondis par les 25 premiers kilomètres de trajet, les galets de granit n'ont plus diminué de poids que très lentement. Les nouveaux kilomètres ne leur ont fait perdre que $\frac{1}{100}$ à $\frac{1}{400}$ de leur poids. Soit $\frac{1}{2\,500}$ à $\frac{1}{10\,000}$ par kilomètre, ou de 0.0004 à 0.0001.

La quantité de limon produite par différentes roches conduit aux coefficients d'usure suivants [1] :

Feldspath anguleux	0.003
Feldspath arrondi	0.002
Obsidienne	0.003
Serpentine	0.003
Silex de la craie	0.0002

L'étude expérimentale de ce genre de dénudation comporte une partie historique qui n'est pas dépourvue d'intérêt. Déjà en 1774 Frisi [2] décrit des expériences sur la formation artificielle des sables par le choc des pierres. Ses résultats sont remarquablement négatifs et l'auteur constate son désaccord avec Guglielmini. On avait cependant des preuves de l'usure dans les rivières des matériaux charriés et, à cet égard, on pouvait déjà citer des expériences spontanées. Plus tard, vers 1850, on retira du Rhin un éclat d'obus qui était probablement tombé dans le fleuve lors du siège de Huningue en 1815; il avait les angles de ses cassures arrondis et polis. Un boulet de fonte, dont la presque totalité était enchâssée dans un gravier que l'oxyde de fer avait agglutiné autour de lui, était fortement aplati et poli dans sa partie libre.

A cet égard il est tout à fait utile de citer ici une expérience d'Edouard Collomb [3] :

50 galets striés de roche schisteuse bleue assez dure, de la moraine de Wesserling, ont été placés dans

1. D'après M. Daubrée; *Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 551, 1857.
2. *Traité des rivières et des torrents*, p. 14 et 15.
3. *Preuves de l'existence d'anciens glaciers dans les vallées des Vosges* (1847, p. 28).

un cylindre horizontal creux en fonte de 1 m. 30 de long, fermé aux extrémités par deux disques en fonte et tournant sur son axe. Ces galets ont été préalablement mélangés avec leur volume de sable de rivière et 25 litres d'eau. Puis on a imprimé au cylindre un mouvement lent de 16 tours par minute seulement.

Après six heures, on a retiré quelques galets (ils avaient parcouru sensiblement 8 kilomètres). Les stries les plus délicates avaient déjà disparu. Après vingt heures (c'est-à-dire après 30 kil. environ), toutes les stries avaient disparu.

L'eau ayant servi à l'expérience est devenue boueuse.

La forme des galets paraît n'avoir avec la nature pétrographique des roches qu'un rapport peu intime. Elle varie le plus pour les roches fissiles : gneiss, phyllades, etc., qui donnent des ellipsoïdes plats.

Pour les roches dépourvues de *joints*, elle est sensiblement identique, quelle que soit la rapidité de production qui, elle, tient à la cohésion et à la dureté.

Il en est tout autrement pour les sables, dont les grains ont fréquemment une forme qui reflète la structure du minéral dont ils sont formés.

Les plans de clivage interviennent fréquemment et les formes des cassures persistent. C'est ainsi que le sable feldspathique est à grains prismatiques; le sable quartzeux à grains irréguliers à cassure conchoïdale.

Souvent des cristaux sont conservés en entier; c'est le cas pour des grains de fer oxydulé, des cristaux de grenat et de zircon, des paillettes de mica, etc.

La dimension des fragments est fréquemment en relation avec leur degré d'usure. Les petits saphirs de Ceylan ont souvent conservé toute la fraîcheur de leurs arêtes, tandis que les gros cristaux des mêmes alluvions sont ordinairement tout à fait frustes.

Il est rare que les grains de sable soient arrondis; d'habitude ils sont anguleux.

Pourtant le sable charrié au fond des rivières, ou ballotté le long du littoral, peut se polir et s'arrondir comme font les galets. Il faut pour cela qu'il ne soit pas assez fin pour entrer en suspension dans l'eau. La dimension des grains qui peuvent flotter dans l'eau très faiblement agitée est de $\frac{1}{10}$ de millimètre. Tout sable plus fin sera anguleux.

Il importe d'insister sur le discernement avec lequel doivent être conduites les expériences rotatives qui viennent d'être résumées. Si la vitesse, en s'augmentant, accentue le résultat pendant un certain temps, une limite est bientôt atteinte cependant où la force centrifuge immobilise les galets contre la paroi du pot qui tourne. Il est clair qu'à partir de ce moment tout travail d'usure est supprimé. Et c'est pour élargir les limites entre lesquelles on peut opérer que M. Stanislas Meunier a ajouté à l'appareil une pièce excentrique qui détermine périodiquement un choc et varie l'allure du frottement.

Si la rotation autour d'un axe peut présenter quelque différence avec les mouvements auxquels les galets sont ordinairement soumis dans le lit des rivières,

elle offre au contraire la ressemblance la plus étroite avec l'impulsion que des matériaux pierreux peuvent recevoir dans les *tourbillons* aqueux.

Aussi a-t-il été facile d'obtenir expérimentalement l'imitation des effets qui se produisent alors, et M. Stanislas Meunier a ainsi produit des fac-similés des marmites de géants si fréquentes dans le lit des torrents. Dans une cuve (V. plus loin la fig. 18, page 133, un appareil très analogue) est coulée une couche de plâtre gâché et, quand la prise commence, on le recouvre d'une dizaine de centimètres d'eau. On y place quelques billes et autour d'elles un cylindre de fer-blanc dans l'axe duquel est disposée une roue à palettes à axe vertical actionnée par une petite turbine. Le mouvement de l'eau entraîne les billes et très rapidement on voit se faire une excavation dont tous les détails coïncident avec ceux des marmites naturelles. L'auteur a substitué au plâtre, soit une pâte d'argile, soit une dalle de craie, et il est certain que toutes les roches céderaient à des meules assez lourdes et à une rotation assez longtemps continuée.

Ces études permettent de préciser bien des faits sur l'influence de la vitesse et sur celle de l'approfondissement de la cavité; sur sa continuation plus ou moins facile et sur son arrêt définitif. Le cas de plusieurs billes agissant ensemble a été comparé à celui d'une bille unique.

Régression des cours d'eau. — Les expériences sur les cours d'eau ont un grand intérêt, en rendant très manifeste l'allure essentiellement régressive qui do-

mine toute l'histoire de ceux-ci. Pendant que l'eau descend, tous les traits des divers points du lit remontent vers la région des sources, qui gagne elle-même vers l'amont. Nous aurons à retrouver ces circonstances à propos de la sédimentation; en ce qui concerne la dénudation, elles sont spécialement frappantes.

Tout d'abord, nous pouvons étudier un détail remarquable des cours d'eau : la chute qui brise son allure là où un seuil barre le lit. On constate que la chute est soumise à la régression et dans certains cas elle recule très rapidement.

Dans ses expériences sur les plages sableuses, M. Stanislas Meunier a déterminé la régression des chutes, avec la plus grande facilité, en activant par une excavation la portion inférieure du cours.

On la reproduit par la méthode de corrosion du calcaire avec l'eau acidulée et avec l'avantage de pouvoir conserver les échantillons obtenus.

Les applications aux faits naturels sont directes et on peut refaire pour ainsi dire l'histoire de toutes les chutes, par exemple de celle du Niagara qui a tant fixé l'attention.

On sait que la constatation positive de la régression de la chute remonte à 1678 et à 1751, époques des observations d'Hennepin et de Kalm. On en a conclu que le canal de 11 kilomètres, situé au-dessous, a été creusé peu à peu par le fait même de la régression. Lyell, dans la relation de son voyage aux chutes, insiste sur les vestiges d'un ancien lit, 90 mètres au-dessus du lit actuel. D'après le calcul, d'ailleurs un

peu incertain, du célèbre géologue, la chute du Niagara aurait reculé de 5 kilomètres et demi en 35 000 ans environ. Le recul actuel est de 30 centimètres par an. C'est là un trait de toutes les chutes, intéressant surtout parce qu'il ne fait qu'accentuer, comme nous l'avons déjà dit, la régression des conditions locales des cours d'eau. C'est une conséquence de la régulation du profil du cours, phénomène qui amène dans bien des cas une vraie *régression de la source* elle-même, c'est-à-dire qu'il peut se traduire par le fait de la *capture*.

Il n'y a que peu de temps qu'à la suite de M. Morris Davis l'attention a été appelée sur le phénomène de la capture des rivières; mais il y a des années que M. Stanislas Meunier l'a vu se produire dans les expériences de Saint-Lunaire.

On peut, comme cet auteur l'a montré, assister instantanément au phénomène de régression de filets d'eau par un dispositif très simple.

Dans une cuvette quadrangulaire on verse du plâtre à mouler, gâché dans une quantité convenable d'eau. Quand la consistance est sensiblement celle du fromage blanc on redresse la cuvette, de façon à lui faire faire un angle de 40 à 45 degrés sur l'horizon. On voit alors sur son bord inférieur se dessiner à des distances peu différentes les unes des autres de petits filets de dégorgement, et ces filets s'allongent très vite *par leur partie supérieure*, de façon à prendre bientôt l'apparence donnée par la figure ci-jointe (fig. 9). Comme ils se compliquent successivement d'affluents,

c'est comme une arborisation au développement de laquelle on assiste et qui est du plus remarquable effet. En maintes localités de ce réseau, il se fait des captures qui dépendent du débit inégal dans les différents canalicules [1].



Fig. 9. — Imitation artificielle des phénomènes de régression et de capture dans le cours d'eau. Le filet *n n'* par exemple tombait dans *R*; il a été dérobé par le filet *m* au filet *r*.

Les conséquences des phénomènes de capture sont beaucoup plus larges qu'on n'a cru d'abord et font comprendre la modification incessante de la surface du sol.

Pour le moment, bornons-nous à remarquer qu'elles intéressent les torrents et en expliquent des circonstances tout à fait incomprises.

Ainsi, dans ses célèbres études sur le régime des torrents des Alpes, Surrel distingue trois phases dans leur histoire, la dernière étant la *stabilité*.

Mais c'est la méconnaissance de l'intervention de la capture, qui empêche la stabilité et remet les choses

1. Cette expérience est importante encore en ce qu'elle montre la tendance irrésistible de l'eau à constituer des filets, même dans des conditions où l'écoulement paraît devoir être identique dans tous les points. Nous aurons à y faire allusion prochainement, à propos du creusement des vallées.

en état d'activité aussi longtemps qu'il y a un relief notable, c'est-à-dire qu'il y a un torrent.

Le fait de la capture des torrents, si facile à imiter par l'expérience, permet aussi de restreindre en certains cas les suppositions exagérées émises parfois quant à l'efficacité des glaciers.

Comme exemple emprunté à la région des Préalpes romandes, on peut citer d'après M. Schardt un bloc erratique de poudingue éocène de Chaussy, gisant au-dessus du Pont de Jaman à 1475 mètres d'altitude, sur le sentier qui conduit de Cau à Chamosalaz, à 10 mètres au-dessous du col qui est à 1485 mètres.

Au lieu de le faire passer par-dessus ce col par le glacier de l'Hongrin, on aime mieux lui faire remonter la vallée sur le dos du glacier du Rhône. Mais c'est qu'on raisonne comme si la surface du sol n'avait jamais changé et comme si le col de Jaman avait toujours existé [1].

La notion de la capture, justifiée par les expériences, nous permet de rétablir les faits :

Nous admettons dans le passé une ligne de pente favorable à la descente de blocs, par un torrent passant par-dessus le col, puis la capture de sa partie antérieure par un torrent secondaire qui est venu capturer la tête du ravin antérieur et faire un *trait de scie* transversal. Toutes les particularités locales s'expliquent d'elles-mêmes dans cette manière de voir.

1. V. Schardt et Ev. Favre, *Descript. des préalpes du canton de Vaud.* Berne, 1887; vingt-deuxième livraison des Matériaux pour la carte géologique de Suisse, p. 252.

Conclusion des expériences. — Parmi les conclusions des expériences relatées plus haut, il faut retenir ici que les sillons d'érosion sur une surface plane inclinée arrivent à dessiner un *réseau* qui présente les plus grandes analogies avec les réseaux de cassures.

Par exemple, pour les vallées de la haute Normandie et de la Picardie, on a défendu cette opinion qu'elles ont été dirigées avant tout par des systèmes de géoclases conjuguées qui auraient débité le sol en compartiments plus ou moins rectangulaires. Or l'érosion d'un sol régulièrement incliné et sensiblement homogène, par de l'eau qui ruisselle à sa surface, se traduit par la production de sillons parallèles entre eux et à la ligne de plus grande pente. Bientôt sur les flancs de ces sillons se produisent des filets secondaires, vrais affluents des premiers, et qui creusent des sillons parallèles entre eux et dont la direction commune est déterminé par les deux lignes de grande pente des deux érosions successives.

Le travail horizontal des cours d'eau.

Si nous examinons le travail horizontal d'un cours d'eau, nous trouvons que celui qui est ainsi réalisé a d'ordinaire toute chance d'être plus large que le cours d'eau lui-même; et à cet égard il ne faut éliminer que le cas précédent d'un cours serré entre les parois d'une gorge.

Pour prendre le phénomène à son début M. Stanislas Meunier a installé l'expérience suivante.

Une dalle de calcaire bien lisse (polie, si on veut) étant inclinée à 35 degrés, on fait arriver par le milieu de son côté supérieur un courant d'eau légèrement acidulé et on en fait une nappe par la compression horizontale de l'ajutage. La surface mouillée est triangulaire, ayant l'ajutage pour sommet et mesurant par exemple à la base 30 centimètres. Attachons-nous à maintenir le courant très sensiblement constant.

Nous constaterons, au bout de quelques heures, que la nappe liquide s'est rétrécie progressivement; de sorte que très rapidement la surface marquée au sceau de l'action fluviaire sera bien plus large que le courant d'eau.

Il est évident que si l'expérience était montrée à ce moment à un spectateur non préparé, celui-ci conclurait de l'apparence que le filet d'eau a diminué de volume depuis le commencement de son action. Et l'on a peine à croire que des géologues de profession aient fait preuve de la même naïveté, tout à fait plaisante, en présence de ce fait constant que les vallées d'érosion (à part les gorges) sont toujours notablement plus larges que la rivière qui coule dans leur thalweg.

Le fait s'explique cependant bien aisément par l'inégalité des vitesse des différents filets d'eau composant le jet et conséquemment par l'inégalité de l'usure qu'ils réalisent. Les filets du milieu sont les plus efficaces; ils creusent un sillon et le cours d'eau pour le remplir doit abandonner ses premières rives et se concentrer vers son axe.

Le fait est si vrai qu'il se reproduit avec le dispo-

sitif adopté par MM. de la Noë et de Margerie et que représente la figure ci-jointe (fig. 10).

Un jet de sable coulant d'un entonnoir dans du plâtre

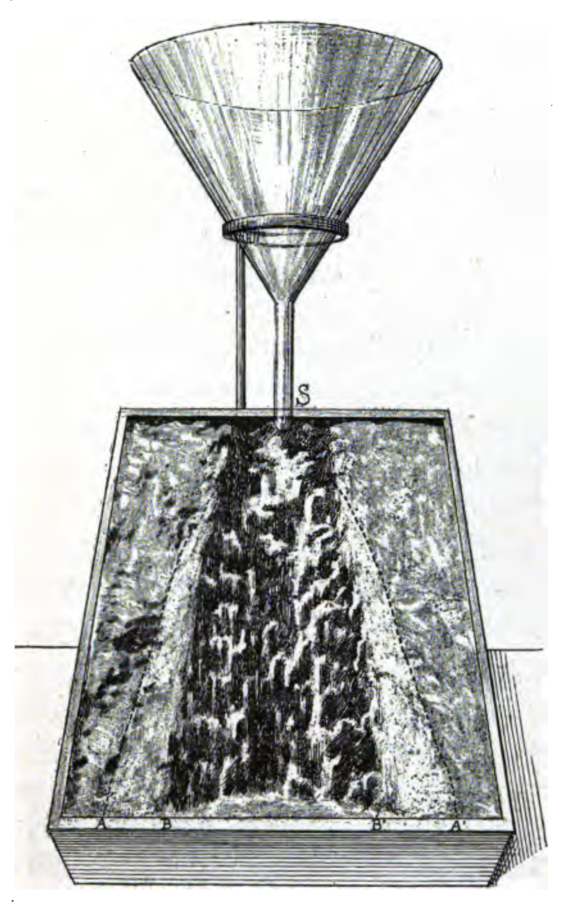


Fig. 10. — Imitation artificielle des phénomènes d'érosion fluviaire.

en poudre tassée, y fait de même une excavation peu profonde et très large ASA' qui se rétrécit bientôt et se concentre en une gorge médiane BSB'. C'est donc

un fait général, et on peut dire que l'expérience seule a été décisive pour expliquer pourquoi les rivières ordinaires coulent au milieu d'une nappe alluviale plus large qu'elles.

Nous verrons le parti très important qu'on peut aussi tirer de là en ce qui concerne l'allure générale du phénomène de creusement des vallées.

Mais on s'aperçoit bientôt qu'une autre circonstance vient s'ajouter à celle-ci, pour élargir considérablement la surface actionnée par un cours d'eau. Il s'agit de la production des méandres.

Cette production des méandres peut s'obtenir par le moyen d'un obstacle placé dans le courant, et c'est ce qui a été réalisé maintes fois dans les expériences de Saint-Lunaire : l'on peut voir au Muséum un moulage de ces filets.

Comme petit détail intéressant de ces expériences, ajoutons qu'elles permettent de vérifier certaines circonstances des affluents. Il s'agit de l'angle sous lequel se fait le confluent, et de sa variation pendant le déplacement des méandres, avec production d'un triangle remanié à chaque instant par suite de cette circonstance que l'affluent suit le chemin le plus court.

En même temps, on assiste à l'accentuation progressive des méandres et à la production successive d'une large surface intéressée bientôt par le mince filet d'eau.

De sorte que les conséquences, au point de vue du creusement, ont été nombreuses.

On peut faire des expériences en petit par plusieurs procédés. M. Stanislas Meunier a pris une cuvette plate

où l'on a coulé du plâtre fortement mélangé de sable et encore incomplètement pris : un filet d'eau amené par un tube de caoutchouc, avec une vitesse et une inclinaison variables, y a creusé un sillon sinueux où tous les phénomènes relatifs aux méandres se sont développés à souhait.

Le même auteur a usé d'un autre procédé, qui consiste à faire agir, sur du plâtre incomplètement pris, un filet de mercure qui, à cause de sa forte densité, est très efficace.

Avec une pente de 20 degrés, on voit les méandres se déplacer et couvrir successivement une surface très large.

Enfin nous ajouterons que le phénomène si important de l'*écoulement des méandres* s'imite exactement à l'aide d'une corde flexueuse tenue par un bout, et agitée parallèlement à une planche oblique sur laquelle on l'a déposée. La figure 11 indique le dispositif adopté, qui reproduit un amusement auquel souvent se livrent les enfants.

Si, la planche étant noire, la corde est enduite de poudre de craie, elle laisse une trace qui représente une surface limitée par les tangentes aux plus grandes divagations des méandres. Cette trace correspond à la région qu'une rivière recouvre de son diluvium : la craie correspondant à la matière incohérente charriée par la corde qui représente le filet d'eau. Et déjà nous avons ici l'explication expérimentale de l'extension du diluvium réalisée sur la surface d'une vallée large par une rivière étroite.

Mais on peut aller plus loin et c'est ce que fait sentir la figure 12. Il faut en effet se rappeler ce qui a été dit plus haut à propos du travail vertical dans l'érosion fluviaire, de la tendance des cours d'eau à la contraction sur leur ligne de plus grande vitesse et du mode d'action des eaux sauvages, pour comprendre

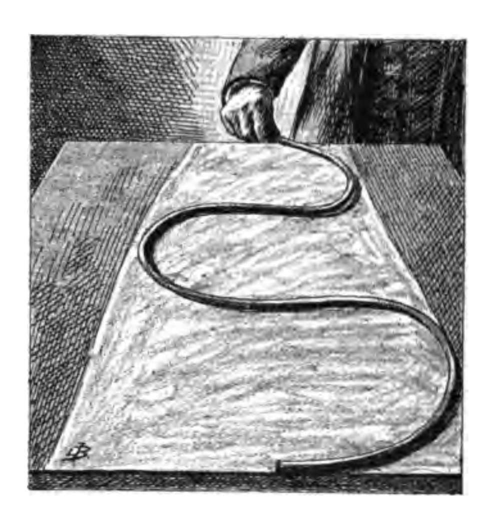


Fig. 11. — Expérience sur l'écoulement des méandres des rivières.

qu'avec le temps, le profil transversal moyen de la vallée se modifie, se creuse et augmente successivement sa courbure.

M. Stanislas Meunier a imité cette condition en infléchissant un peu la surface sur laquelle tout à l'heure était agitée la corde. En l'agitant de nouveau, avec une énergie aussi semblable que possible à la première, on s'aperçoit qu'elle ne se permet plus de divagations aussi larges. Si on la charge de colcothar,

on constitue, à l'intérieur de la surface blanche déjà colorée, une surface rouge plus étroite, qui est limitée par les tangentes aux nouveaux méandres.

La conséquence c'est que, dans une vallée normale, les méandres tendant à se rétrécir avec le temps, des

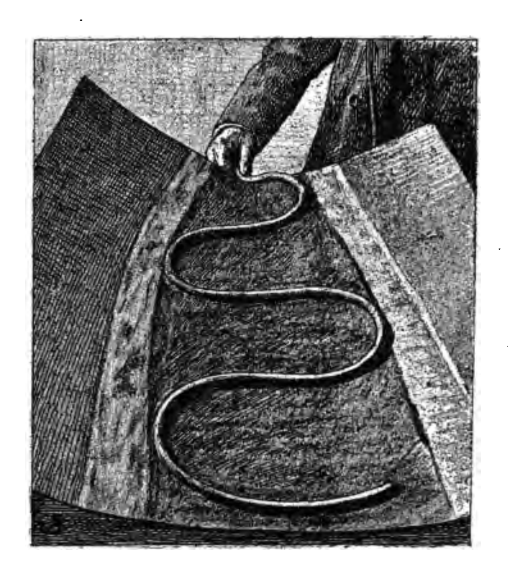


Fig. 12. — Expérience sur la formation des terrasses des rivières.

dépôts fluviatiles pourront cesser d'être accessibles à des remaniements ultérieurs, bien que le volume de la rivière soit resté le même. Nous reviendrons sur cette conclusion des phénomènes d'érosion, pour montrer comment ont dû se faire, par un procédé bien plus simple que celui qu'on invoque d'ordinaire, les *terrasses* des rivières.

Conclusion. Allure progressive du creusement des vallées.

La conclusion de ces résultats, c'est qu'un cours d'eau étroit modifie directement une surface de sol beaucoup plus considérable que la sienne.

Et il résulte du rapprochement de cette conclusion avec celle qui concernait le travail vertical, qu'un cours d'eau peut être l'auteur d'une dénudation dont le volume est considérablement supérieur au sien.

On sent quel profit la Géologie générale peut faire de semblables notions, en éliminant, d'un chapitre qui leur semblait très favorable, une série de causes violentes et extraordinaires.

La méthode expérimentale est ici d'un secours particulier en montrant avant tout comment se fait la *régression des vallées*, qui n'est que la continuation de leur creusement même.

On constate que la partie où s'est faite une capture ne diffère, par aucun caractère, des parties situées plus bas, et il est impossible de ne pas en conclure que toute la vallée s'est creusée par le mécanisme qui a présidé moins anciennement à la constitution de la partie dite *captée*.

Ceci est décisif et les partisans des cataclysmes ne sauront jamais concilier leur doctrine avec le résultat des observations et des expériences.

Il est permis de constater que les *Actualistes*, comme on les appelle, ont toujours admis cette conclusion : le caractère essentiellement progressif de la dénudation

éclate aux yeux dans bien des pays et spécialement là où, à des moments variés, des lambeaux de la surface du sol ont été immobilisés et constituent des sortes de *témoins* de l'état des choses à diverses époques.

Le géologue anglais Poulett-Scrope a fait dans son bel ouvrage sur les *Volcans de la France centrale* une série d'observations de la plus haute valeur, sur l'allure progressive et lente de la dénudation subaérienne du sol. Il a montré[1] comment les coulées successives des puys d'Auvergne nous ont conservé comme des échantillons de la surface du sol à divers moments de la période depuis laquelle les éruptions ont commencé. Or, les altitudes de ces points comparées à leur âge relatif est d'une éloquence sans réplique.

Il est très honorable pour la science française de constater que Poulett-Scrope a été précédé dans cette voie par Daubuisson de Voisins qui, dans le premier volume de sa *Géognosie* (1819), pp. 237 à 241, est tout à fait explicite, et insiste sur la *lenteur du creusement des vallées* en invoquant les enseignements fournis par le sol de l'Auvergne.

Il fait en outre remarquer que Playfair, dans son explication de la théorie de Hutton, a fait des observations analogues, qualifiant d'*élément différentiel* le travail d'érosion réalisé pendant une période limitée et chargeant le temps de son *intégration*.

C'est une raison de plus de s'étonner du succès que rencontra le point de vue diamétralement opposé

1. *Géologie et volcans éteints de la France centrale*, p. 218.

que défendirent, avant 1870, Belgrand, Hébert et une série d'autres auteurs.

A la page 39 de son grand ouvrage sur le Bassin de la Seine, Belgrand écrit : « On a trop souvent confondu les *actions lentes* et les *causes actuelles*. Je suis grand partisan des causes actuelles, c'est-à-dire des forces qui sont encore en jeu dans la nature. Ces forces, à la vérité, ne produisent aujourd'hui que des actions lentes *parce que nous sommes dans une période de tranquillité géologique* (!) ; mais dans les temps de convulsions, de soulèvement des grandes chaînes montagneuses notamment, elles ont pu produire des mouvements rapides du sol et des actions violentes. »

Et pour bien préciser sa pensée il ajoute : « Je crois que le soulèvement dès Alpes s'est fait rapidement et que c'est à ce grand cataclysme qu'il faut attribuer le déplacement d'eau qui a raviné le bassin de Paris ».

Pour ce qui me concerne, je suis bien heureux de pouvoir constater que j'ai été, dès le début de mes études, convaincu par la vue des faits de la parfaite continuité de l'évolution géologique.

Mes assertions ont souvent provoqué des protestations, qui du reste ont été progressivement en s'affaiblissant, et il serait facile de montrer que tel de mes contradicteurs qui allait jusqu'à m'accuser de la *manie des causes actuelles* s'est maintenant singulièrement rapproché de mon point de vue constant.

Je crois avoir le droit de penser que j'ai contribué pour ma part à ce revirement d'opinion et l'on me permettra de rappeler que dès 1875, dans ma *Géologie*

des environs de Paris, j'écrivais (p. 440) : « On peut admettre que le fleuve (la Seine) n'était à l'époque quaternaire ni plus volumineux ni plus rapide qu'à présent. Grâce à la puissante collaboration d'un temps indéterminé, il a élargi sa vallée, et de leur côté les agents atmosphériques ont travaillé sans relâche à adoucir les pentes. » En 1879, dans mes *Causes actuelles en Géologie* (p. 179), je disais de même : « Un fleuve même étroit arrive, au bout d'un temps suffisant, à remanier tout le sol qui constitue le fond de sa vallée et à lui imprimer des caractères tels qu'on serait tenté, par un examen superficiel, d'y voir la trace du passage d'un cours d'eau extrêmement large. » Aujourd'hui, que je puis ajouter aux arguments de naguère la série des résultats expérimentaux dont on vient d'avoir un résumé, je pense que la démonstration est complète.

En somme, les expériences nous montrent qu'on se fait une très fausse idée du mécanisme du creusement des vallées en y voyant, comme on le fait d'ordinaire, le résultat exclusif d'un outil agissant sur le sol de l'amont vers l'aval. L'action, en réalité, est double et comprend une composante prépondérante, qui est dirigée, au contraire, de l'aval vers l'amont et qui, en déterminant la *régression* de tous les éléments des cours d'eau, donne à la vallée complète son véritable caractère. Cette action est exercée non seulement par le filet d'eau, auquel d'habitude on accorde trop d'importance, mais par les eaux de ruissellement superficiel et par la nappe souterraine adjacente, dont la quantité

est d'autant plus grande qu'on considère la vallée plus loin de sa source, là où la surface est aussi plus considérable. Ce point de vue, qui résulte si inévitablement des essais expérimentaux, est seul capable de faire ressortir le véritable caractère de la dénudation fluviaire et de donner l'interprétation saine des faits d'observation.

D'ailleurs, il convient d'ajouter que pour avoir une idée complète du résultat produit quant au modelé terrestre, par le jeu combiné des eaux de ruissellement et des eaux sauvages, il faut ajouter à leur œuvre dénudatrice ce qui revient aux dépôts très variés qu'elles édifient.

C'est donc un peu plus loin que nous pourrons formuler des conclusions définitives.

CHAPITRE III

La dénudation marine ou lacustre.

Après les détails relatifs à la dénudation par l'eau sauvage et par l'eau courante, il ne nous reste pas grand'chose à ajouter quant à la dénudation opérée par l'eau réunie en amas dans le bassin des mers ou dans celui des grands lacs.

Action mécanique des flots.

Ce qui la caractérise surtout, c'est l'influence des grands vents qui soulèvent l'eau sous la forme de vagues.

Le spectacle majestueux de l'attaque des falaises par la mer durant une tempête, procure une haute idée de la force mécanique des flots. On a cité à cette occasion un nombre immense d'exemples. D'après M. Thoulet[1], un bloc de 1350 tonnes a été, à Wick, sur la mer de Nord, jeté à une distance de 10 à

1. *Océanographie dynamique*, p. 56.

15 mètres. Aux Shetland, en une nuit, un quartier de gneiss de trois tonnes fut porté à 100 mètres environ. Au Bishop's Rock, une colonne de fer de 7 m. 50 de longueur, pesant 3000 kilogrammes et que, la destinant à un phare en construction, on avait attachée à des roches au moyen de chaînes, fut emportée à 6 mètres de distance et jetée sur une falaise haute de 3 mètres. Et l'on s'explique, par ces exemples, comment Yvon Villarceau a pu constater que, dans le pays de Dunkerque, le sol tremble à un kilomètre et demi du rivage pendant les tempêtes sous le choc des vagues.

Des expériences de mesure ont été faites par Thomas Stephenson en 1843 au phare de Bell-Rock et à Sherryvore, grâce auxquelles on a pu chiffrer l'énergie mécanique des flots. L'appareil est un vrai dynamomètre à plateau, qui conserve, par le déplacement d'anneaux convenablement disposés, la trace de l'effort maximum auquel il a été soumis. Après le choc des vagues, l'auteur trouva des nombres variant de 17 tonnes à 30 tonnes et demie et même à 34 tonnes par mètre carré.

D'un autre côté, une vraie expérience, convertie en un appareil industriel, permet de contrôler l'efficacité dénudatrice du choc de l'eau sur les roches. Nous faisons allusion à l'emploi, dans l'exploitation des alluvions aurifères, de l'instrument désigné d'abord en Californie sous le nom de *monitor*, et qui a été importé en Australie, à Madagascar et bien ailleurs.

Dans le laboratoire, un petit jet d'eau permet

d'imiter le même dispositif et de préciser ce qui concerne la dénudation des roches par l'eau violemment projetée à leur surface.

Il ne faut d'ailleurs pas oublier qu'au bord de la mer, les flots sont puissamment aidés dans leur œuvre de dénudation par les galets et autres matériaux que les vagues, comme des catapultes naturelles, lancent contre le pied des falaises. Il y a là matière aussi à des essais d'imitation, qui se confondent avec les précédents, dans les appareils où l'on a reproduit les conditions principales du mouvement du flot.

M. Fayol emploie une caisse peu profonde, pouvant osciller autour d'un axe et où de l'eau est soumise à un mouvement de balancement plus ou moins isochrone. M. Stanislas Meunier emploie une caisse en forme de prisme triangulaire rectangle, dont le plan hypoténuse fait le fond, tandis que l'un des deux autres plans, maintenu vertical, fait la face postérieure, et que le troisième, beaucoup plus long, représente l'ouverture supérieure du récipient. Le plan qui constitue le fond fait avec l'horizon un angle aussi peu ouvert qu'on le désire. On verra p. 176 le portrait de cet appareil.

De l'eau étant mise dans le vase, une roue, disposée presque tangentiellement sur l'arête orthogonale du prisme, vient battre l'eau avec des palettes aussi longues que le réservoir est large et donne lieu ainsi à des ondes successives qui imitent les vagues dans beaucoup de leurs caractères. On peut leur faire démolir des falaises sableuses et constater des analogies

remarquables de forme avec les falaises naturelles. Mais c'est à propos de la sédimentation marine que nous aurons à donner le plus de détails sur ce mode opératoire. Disons seulement qu'avec une falaise comprenant des petits filons de plâtre au travers d'un sable tassé, on donne lieu à une dissection véritable reproduisant les formes des quilles et des rochers isolés de la « Grande côte de Bretagne » et du littoral norvégien.

On peut rappeler que Krümmel [1] a composé un appareil pour imiter les courants produits dans la masse marine par le vent, et qu'on peut l'employer à examiner une série de questions parmi lesquelles figure la dénudation sous-marine. C'est d'ailleurs un sujet qui devra être repris.

Il va de soi que les expériences citées plus haut sur la production des galets, s'appliquent au présent chapitre, comme à l'histoire de la dénudation fluviaire, et expliquent maintes particularités observées.

On y arrive encore mieux, en modifiant cet instrument comme le fait M. Stanislas Meunier, de façon à associer, à l'aide d'un excentrique, des chocs plus ou moins violents et plus ou moins répétés au simple frottement. On fait alors des éclats, qui composent un sable anguleux pareil à celui qui se présente à certains niveaux sur nos côtes crayeuses de haute Normandie. Ce sable a, comme limite de grosseur des grains, la dimension compatible avec le *balancement* dans les vagues. La forme des grains de ce gravier

1. *Handbuch der Ozeanographie*, t. II, p. 354.

est souvent voisine de tétraèdres très surbaissés ou de lames à section triangulaire.

Ajoutons que les remous de la mer le long des côtes déterminent des phénomènes tourbillonnaires identiques à ceux qui, dans les torrents, donnent naissance aux marmites de géants. Le procédé expérimental exposé plus haut s'applique ici sans changement.

Action chimique des eaux.

Mais, on n'aurait évidemment de la dénudation marine qu'une idée très incomplète si on n'y voyait qu'un phénomène mécanique. Une série de réactions chimiques viennent collaborer à l'effet final, beaucoup de roches étant solubles ou attaquables par l'eau marine. A cet égard, il y aurait à répéter ce que nous avons dit pour la dénudation subaérienne en général et l'on ne doit pas oublier ce facteur très important du résultat définitif. De plus, à côté des masses simplement solubles comme les calcaires ou mieux encore comme les gypses, qui en quelques pays, tels que la Nouvelle-Écosse, font à eux seuls des falaises élevées, il y aurait lieu de mentionner quelques cas intéressants et relatifs à la circulation en des lieux exceptionnels de réactifs spéciaux. Nous avons considéré des phénomènes de ce genre à propos de la dénudation subaérienne où ils sont plus visibles.

C'est ainsi qu'il ne faut pas oublier que la dénudation marine comprend un chapitre physiologique : des êtres vivants collaborent à l'œuvre de dénudation des

masses rocheuses par le grand organisme maritime. Des algues et des animaux variés désagrègent des roches de catégories très diverses.

Dans ce domaine l'expérimentation n'a pu trouver jusqu'ici à s'exercer. Cependant nous devons mentionner les essais synthétiques de F. Cailliaud (de Nantes) pour rendre compte du mécanisme employé par les mollusques dits lithophages, pour perforer les roches auxquelles ils demandent un abri [1].

Des divers modes supposés de perforations par les pélécypodes, l'un a été par cet auteur contrôlé au moyen de la méthode expérimentale. Il a démontré en effet qu'on peut, par le frottement des valves de pholades, réaliser des excavations assez profondes pour y introduire la coquille tout entière.

Dans le calcaire et dans le gneiss, en opérant sous l'eau, il a pratiqué en une heure et demie une excavation de 18 millimètres de profondeur.

Cependant il reste des doutes sur la légitimité de la conclusion d'après laquelle l'animal opérerait exactement par ce procédé.

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXIII, p. 572, et t. XXXIX, pp. 34 et 755.

CHAPITRE IV

La dénudation glaciaire.

De tous les chapitres relatifs aux actions dénudatrices c'est peut-être celui qui concerne les glaciers qui a prêté le plus à des applications de la méthode expérimentale.

Et, chose curieuse, c'est en même temps celui qui a provoqué le plus de résistance, certains géologues contestant le fait même de l'érosion glaciaire, allant quelquefois jusqu'à voir dans les glaciers un agent de protection de la surface du sol.

Par exemple Ch. Grad [1] voit dans les glaciers un *agent de protection* de la roche sous-jacente. Mais il commet ici une confusion, car s'il est certain que le *poli* protège les roches, de sorte que c'est pour cela que nous les polissons, d'un autre côté le poli que ces roches présente est le témoignage irrécusable de l'usure énergique qu'elles ont subie. C'est un point qu'il va y avoir intérêt à préciser.

1. *Comptes rendus*, t. LXXVIII, 759, 1874.

Tout d'abord il est nécessaire de remarquer que l'eau congelée peut agir comme agent de dénudation des roches par deux procédés bien différents, qui se relient intimement : le premier au fait connu sous le nom de *gélivité* et l'autre au phénomène de la progression des glaciers. Il convient de les examiner séparément.

La congélation de l'eau et la gélivité des roches.

La glace surnageant l'eau, Galilée en conclut que celle-ci doit se dilater en se congelant, et les académiciens de Florence vérifièrent le fait par des expériences variées et concluantes. Ils constatèrent que les volumes de l'eau liquide et de l'eau solide sous le même poids, sont :: 8 : 9. On a trouvé depuis :: 10 : 11, ce qui est peu différent. Le point essentiel pour nous c'est que cette variation de volume s'accompagne d'un effort mécanique très intense. En décembre 1784 et en janvier 1785, le major Edward Williams fit des expériences à Québec, où des bombes remplies d'eau éclatèrent avec détonation. Leur bouchon fut lancé au loin, et un cylindre de glace sortit de l'orifice. Le 24 janvier, par — 24°, la bombe qui creva, se sépara en deux moitiés et deux lames de glace firent saillie par la fissure produite.

Au commencement de 1870, Ch. Martins et G. Chancel reprirent ces essais [1].

Une bombe de 22 centimètres de diamètre extérieur

1. *Comptes rendus*, t. LXX, p. 1149 et 1251.

et de 26 millimètres d'épaisseur (2610 cent. cubes), remplie d'eau à + 4°, fermée très hermétiquement, fut placée dans un mélange réfrigérant. Au bout d'une heure et demie, elle éclata et il sortit en 81 cent. 4, d'où les auteurs concluent à une pression de 550 atmosphères.

La congélation se fait par la surface; il reste dans la masse un noyau liquide dont Martins et Chancel ont constaté directement l'existence et dont la congélation finale détermine l'explosion.

Les bombes font explosion, non pas sous un choc direct, comme par l'effet de la poudre, mais sous une pression lente, continue et graduée [1].

A cet égard, il faut remarquer que l'eau, par la dilatation qu'elle éprouve en se solidifiant, est loin d'être une exception unique, et il n'y a plus lieu de réfuter les considérations du genre de celles auxquelles se livrait Rumford sur les vues de la Providence, et qui ont été citées par Tyndall [2].

On sait par exemple que le fer jouit de la même propriété et c'est même sur elle que M. Moissan a récemment fondé l'expérience qui procure la synthèse du diamant.

Il en est de même aussi du bismuth dont la fusion, qui a lieu à 247°, peut être réalisée dans un ballon de verre. Il en est encore de même de quelques autres matières.

1. La cause des explosions par la glace peut être compliquée, selon l'opinion de M. A. Barthélemy, par le dégagement des gaz dissous dans l'eau (*Comptes rendus*, LXX, 146, 1870).
2. *Les Glaciers*, p. 121.

Aussi, pour compléter les notions précédentes, M. Stanislas Meunier a-t-il pu étudier expérimentalement les effets de la consolidation des alliages fusibles. Le procédé est très simple; il consiste à faire fondre un de ces alliages (celui de Darcet, par exemple) dans une capsule pleine d'eau bouillante, puis à verser le métal dans un petit ballon de verre contenant également de l'eau chaude. Quand toute l'eau est remplacée par l'alliage on soumet le ballon au refroidissement, soit en l'abandonnant simplement à l'air, soit en le baignant dans un courant d'eau froide. On constate alors que la fracture du ballon ne se produit jamais que bien après la solidification externe. C'est la confirmation expérimentale de l'opinion d'après laquelle l'action mécanique centrifuge est tout entière due à la solidification du noyau interne, qui est d'abord comprimé par une action centripète et qui réagit au moment de la solidification.

Cette opinion a été défendue, comme on le sait, par M. Barthélemy [1], qui en voyait la confirmation dans ce fait, que des pailles jetées sur de l'eau en voie de congelation sont portées, après la solidification, sur une espèce de piédestal. C'est par la même raison que le noyau fluide, persistant après la solidification des points les plus refroidis, est chassé progressivement sous les abris que constituent les pailles et se prend le dernier en se dilatant.

En ce qui concerne les effets de la dilatation de l'eau

1. *Comptes rendus*, t. LXX, 146, 1870.

sur les roches, M. Stanislas Meunier a fait des expériences sur des rognons siliceux de la craie et il a obtenu des explosions, en mettant ces pierres dans un mélange d'eau et d'azotate d'ammoniaque cristallisé. Pour réussir, il faut que les pierres soient munies de leur eau de carrière et qu'elles contiennent, ce qui est fréquent en certaines localités, de petits lopins de craie empâtés dans la matière siliceuse.

C'est cette roche calcaire qui, par son eau d'imprégnation, joue le rôle de coin déterminant les fractures.

Les résultats obtenus par ces expériences si simples sont d'une très grande importance au point de vue de la dénudation subaérienne et rendent compte, de la façon la plus satisfaisante, de la forme des graviers contenus dans le diluvium.

Ce qui l'a surtout démontré à l'auteur c'est la rencontre d'une vraie expérience accidentelle qui s'est faite tout récemment à Prépotin, non loin de Mortagne, dans le département de l'Orne [1]. Des puits profonds de quelques mètres ayant été ouverts dans l'argile à silex, les déblais ont subi les rigueurs de l'hiver. Les rognons, que nul n'avait touchés depuis leur extraction, étaient, au mois de mars 1898, traversés de fines fissures qui s'entre-croisaient en sens divers. Au moindre contact les éclats ainsi produits se séparaient. C'est évidemment le procédé employé par la nature pour remettre en circulation la matière siliceuse con-

1. *Le Naturaliste,* livraisons des 15 juin et 15 septembre 1898.

centrée dans les nodules : les éboulements de terre par les cours d'eau exposent au froid des quantités de silex qui se débitent ainsi en éclats, dont les rivières n'ont plus qu'à adoucir les contours pour en faire des graviers ordinaires.

On doit remarquer en passant que, comme les graviers anguleux du littoral maritime, ces éclats ont la tendance la plus fréquente à se présenter en tétraèdres surbaissés et en lames parfois très longues, à section triangulaire. On les a pris quelquefois pour des produits de l'industrie humaine, tout en s'étonnant de leur nombre prodigieux. Or ce nombre est incomparablement plus grand qu'il ne semble à première vue, la plupart des cailloux arrondis laissant voir qu'ils ne sont qu'un résultat de l'émoussement d'éclats pareils à ceux que nous venons de mentionner. Ici encore, la méthode expérimentale aura été décisive pour résoudre une question qui, sans elle, menaçait de rester indéfiniment en discussion.

Il faut remarquer enfin que d'autres roches, comme les calcaires et les grès, peuvent éclater en fragments identiques aux précédents et d'autre part que des silex, comme d'autres substances, abandonnent souvent des esquilles en forme de calottes sphériques. Toutes les particularités de la gélivité peuvent être suivies expérimentalement.

L'action mécanique des glaciers.

Les géologues étant hésitants de savoir si les glaciers réalisent l'usure mécanique du sol qui les sup-

porte, et les uns l'affirmant pendant que les autres allaient jusqu'à attribuer aux fleuves solides une sorte d'action *anti-dénudatrice*, l'expérimentation a substitué des constatations directes à des suppositions.

Après avoir reconnu qu'un glacier s'écoule selon la pente de la vallée et qu'il charrie, sous sa masse, un lit de matériaux pierreux sur la roche sous-jacente, elle a reconstitué un vrai glacier artificiel et elle l'a mis à l'œuvre. Une plaque de roche a été recouverts d'un petit charriot appuyant sur elle un galet et dont la surcharge représentait le poids et la pression de la glace. Un effort de traction horizontal simulait l'écoulement.

Rappelons que l'usure mécanique réalisée par les glaciers est rendue incontestable par plusieurs faits d'observation qui la démontrent. Ce sont les roches polies et « moutonnées », selon l'expression de Saussure, qui encadrent les glaciers actuels et atteignent ordinairement une altitude fort supérieure à la leur; ce sont les stries, les cannelures, les coups de gouge que portent les roches glaciaires; c'est encore l'énorme masse de limon qui salit tous les torrents glaciaires et qui est sans proportion avec celui qui peut troubler les filets d'eau qui tombent des sommets sur les glaciers. L'Arve, par exemple, est comparable à une vase délayée, et on s'en convainc spécialement à la Batie de Genève, là où le confluent met en contact ses eaux jaunes et opaques avec les ondes bleues et cristallines du Rhône.

Le mécanisme de l'usure glaciaire tient à la fois :

1° A la mobilité de la glace;

2° A l'interposition, entre elle et la roche en place sous-jacente, de pierrailles et de poussières qui agissent par leur frottement.

Les mesures effectuées pendant l'été de 1841 par Agassiz sur le glacier de l'Aar et qui donnèrent le taux de son écoulement, sont de véritables expériences[1].

Le célèbre auteur enfonce des jalons en ligne droite transversale dans la glace, et l'année suivante il constate leur déplacement.

C'est le cas de remarquer de nouveau que l'expérimentation n'a pas seulement pour objectif d'imiter les phénomènes, mais aussi d'en préciser les conditions et les circonstances par des modifications rationnellement provoquées.

Tyndall a démontré[2] l'identité des glaciers avec les cours d'eau au point de vue de la répartition des vitesses.

L'allure étant la même, tous les détails doivent coïncider des deux parts : les méandres, les affluents, la capture se présentent de la même façon.

Il est juste de rappeler que, dès 1773, Bordier (de Genève) comparait la matière des glaciers à « de la cire molle flexible et ductile[3] », et qu'en 1841 Rendu écrivit sa *Théorie des glaciers de la Savoie*, où la plasticité de la glace fixe l'attention.

« Entre la mer de glace, dit-il, et un fleuve, la ressemblance est si complète qu'il est impossible de trouver

1. L'auteur a intitulé son mémoire en effet : *Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels*.
2. *Les Glaciers*, p. 65, Biblioth. scientif. intern.
3. Cité par Tyndall, *Glaciers*, 154.

pour le glacier un seul fait qui ne se reproduise pas pour le fleuve. » C'est la prédiction de ce qui plus tard a été établi par des mesures. C'est Forbes qui a vulgarisé l'expression de *viscosité* de la glace; pour lui un glacier est un fluide imparfait. Et il est intéressant de noter qu'Agassiz ne s'est point rendu à cette idée, sa raison résidant dans la grande *fragilité* de la glace.

Celle-ci n'est d'ailleurs pas contradictoire avec la *flexibilité* apparente si remarquable étudiée par Mathews, par Troude et par Bianconi[1]. Ici encore la méthode expérimentale se signale par une importance décisive.

La fragilité de la glace se manifeste surtout dans les crevasses qui la traversent et la production de celles-ci a été le sujet d'expériences variées.

Tout d'abord nous avons des notions sur leurs allures, d'où il résulte que leur direction est réglée d'après les inflexions du sol : en éventail aux courbes, transversales aux seuils, longitudinales aux reliefs, dirigées comme la vallée.

Le crevassement des glaciers résulte d'une tension gigantesque révélée par les détonations violentes qui accompagnent la fracture. Le phénomène a pu être imité par l'expérience de différentes façons.

A l'aide d'un dispositif très simple, M. Stanislas Meunier a produit des fissures de distension qui rappellent intimement celles dont il s'agit. Une bande de caoutchouc étant fixée par un bout et enroulée par

1. On peut noter que les lames de glace qui sortent des obus éclatés par la gelée montrent déjà la pseudoplasticité de l'eau solidifiée.

l'autre sur un axe pourvu d'une manivelle, on y étale une mince couche de stéarine fondue qui s'y solidifie. Une fois le corps gras refroidi, on exerce sur le caoutchouc une tension progressive, et l'on voit des crevasses se faire perpendiculairement à la traction.

On peut soulever le milieu de la bande de caoutchouc avec un rouleau imitant un seuil, et on voit les crevasses se faire en long, de la même façon que sur les glaciers.

Enfin en enroulant le caoutchouc sur un axe non cylindrique, mais conique, on produit des éventails de crevasses sur le bord le plus distendu.

Un dispositif tout différent consiste (fig. 13) à prendre une plaque rectangulaire de plâtre à mouler de 15 et 20 centimètres de côté et de 1 centimètre d'épaisseur et, avant que la solidification soit complète, à déplacer l'un des côtés parallèlement à lui-même. On voit alors des crevasses se faire selon les diagonales du rectangle et l'application a lieu d'elle-même aux phénomènes naturels.

Le fait qui permet de concilier la plasticité apparente de la glace et sa fragilité, c'est le *regel*, qui a été l'objet de nombreuses expériences.

Ce phénomène, dont le nom a été proposé par Hooker, a été l'objet de premières expériences de Faraday en 1850, qui souda deux morceaux de glace par la pression. On peut à cet égard remarquer que les enfants qui jouent aux boules de neige avaient fait l'expérience bien antérieurement : par le simple malaxage dans la main on produit de vrais glaçons.

Dès 1843, Ladame, professeur à l'Académie de Neuchâtel, a publié dans le Bulletin de la Société des sciences naturelles de cette ville (17 mai 1843, pp. 123 à 136) des observations sur le passage de la neige fari-



Fig. 13. — Imitation des crevasses glaciaires. Par une pression dirigée comme la flèche, le côté CD a été déplacé en CD'.

neuse à la neige grenue et de celle-ci à la glace compacte. Mais c'est seulement depuis le mémoire de Tyndall et Huxley (1857) que la cause du regel est connue, et cette connaissance résulte exclusivement d'expériences. On sait que c'est, en somme, une application du grand fait découvert par Carnot, par James Thomson et par Clausius, de la transformation de la pression en chaleur.

Les expériences de Tyndall sont innombrables. Rappelons seulement celle où des blocs flottants se soudent ensemble par leur simple contact, même dans l'eau chaude, et la série des résultats obtenus par l'emploi de la presse hydraulique. Le moulage de la neige en blocs de glace transparente contient toute l'explication des transformations naturelles de la neige et de la progression des glaciers : une barre de glace tordue lentement se brise, puis se recolle et change de forme comme le glacier qui descend dans sa vallée.

Nous aurons, plus loin, à rappeler ces faits pour signaler l'analogie, avec le regel, des phénomènes de concrétion dans les roches crevassées par torsion. Cette remarque a une grande importance pour la théorie de l'écoulement des roches et pour celle du dynamométamorphisme. Elle fait ressortir, sous une forme spéciale, le grand principe d'unité qui préside aux phénomènes géologiques.

La glace, en se mouvant sur les roches, ne saurait s'attaquer à leur surface. Il faut la considérer comme le moteur des pierrailles interposées entre elle et le sous-sol : galets, sables, limons, dont la présence effective est d'ailleurs hors de toute discussion.

Les traces laissées sur les roches par leur charriage sous la glace sont très caractéristiques. Elles consistent en *stries* produites par les sables; en *cannelures* et en *coups de gouge* déterminés par les galets; en *polissage* réalisé par le limon.

Bien qu'on ait exagéré le caractère exclusif de ce mode d'usure, il est fort important puisqu'il permet

de reconnaître les anciennes régions glaciaires. Aussi a-t-on apporté un grand soin à son étude expérimentale.

On peut étudier le striage des roches réalisé par la progression des glaciers à l'aide de l'appareil de

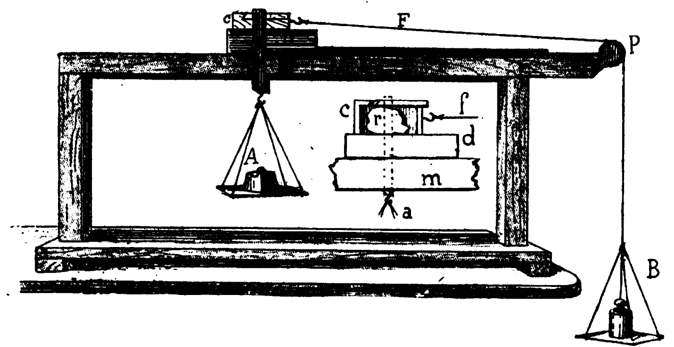


Fig. 14. — Appareil pour le striage des roches. M, montant en bois sur lequel est fixée la roche D en expérience; *c*, petit chariot dans lequel est placé le galet *r*, qui doit strier; A, poids représentant la pression verticale du glacier; B, poids qui à l'aide du fil F passant sur la poulie P, détermine le glissement.

la figure 14. C'est en somme celui dont Coulomb s'est servi pour déterminer les lois du frottement.

M. Daubrée s'en est servi [1] et, dans ses expériences, la vitesse a varié de 1 à 90 centimètres par seconde et on a constaté l'utilité de tenir les surfaces frottantes à l'état humide; il faut reconnaître que les mesures ne sont pas susceptibles d'une très grande précision, mais le fait même de la striation peut être suivi dans tous ses détails. Un point intéressant concerne la liaison réciproque de la pression et de la vitesse. On trouve par exemple que, toutes choses égales d'ail-

1. Cet expérimentateur a eu recours aussi à la machine à raboter la fonte et à la machine à aléser.

leurs, si la vitesse est de $\frac{1}{10}$ de millimètre par seconde, la pression, pour qu'il y ait rayure, doit égaler au moins 100 kilogrammes; tandis que si la vitesse est de 40 millimètres (soit 400 fois plus grande), la pression peut être de 3 kilogrammes seulement (c'est-à-dire 33 fois plus petite). En exprimant les chiffres obtenus par une courbe dont les x représentent les vitesses (en millimètres par seconde) et les y les pressions, en kilogrammes, on obtient une branche d'hyperbole ayant les axes coordonnés pour asymptotes.

Le fragment frotteur s'émousse, et s'il peut tourner il devient rapidement un véritable galet. Il suffit parfois d'un parcours de quelques dizaines de mètres pour que ce résultat soit obtenu. L'entaille ouverte change en même temps de caractère. C'était d'abord une *fine strie*, puis elle s'élargit et peut finir par devenir une *cannelure* rappelant les coups de gouge des montagnes. Enfin le galet peut se pulvériser et alors la strie cesse.

Non seulement deux matériaux de même dureté mordent l'un sur l'autre, mais une roche relativement tendre peut strier une roche plus dure, si elle est soumise à une pression suffisante : le calcaire lithographique doué de 40 centimètres par seconde et pressé à raison de 35 kil. par millimètre carré peut nettement strier le granit.

M. Falsan [1] a réalisé dans la même voie quelques expériences intéressantes.

1. *La Période glaciaire*, p. 190.

Sur une table de marbre poli (fig. 15) légèrement inclinée on étend une bande de caoutchouc dont une extrémité est fixée. L'autre peut subir une traction croissante. Entre la table et la bande on éparpille des débris siliceux. Avant l'étirage, on charge la bande de poids convenables. On constate alors que la

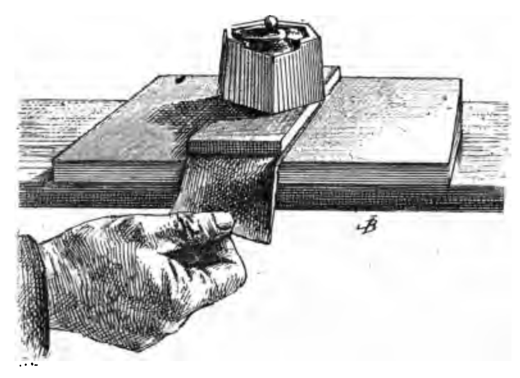


Fig. 15. — Expérience relative au striage des roches.

traction détermine la production de *stries* comparables à celles des glaciers.

Dans ces conditions, la plaque a été mordue et on a pu, en faisant varier systématiquement la vitesse et la pression, dégager la loi du phénomène.

La conclusion est qu'il n'est pas possible qu'un glacier se meuve comme il le fait, sans reproduire aux dépens de son support le travail d'érosion constaté pour les torrents.

Le peu de vitesse est racheté par l'excès de pression et le résultat est comparable.

Il faut rappeler à titre historique que Viollet-le-Duc, dans ses études sur le massif du mont Blanc, avait

déjà pensé à imiter l'économie des glaciers en étirant une bande de caoutchouc sur une surface accidentée. Et avant lui le major Huber [1] avait eu recours à un procédé analogue.

Jean de Charpentier, en 1841 [2], rattachait le mouvement des glaciers à la même cause que la dilatation d'une barre de fer fixée à une extrémité.

Une dernière remarque est nécessaire pour bien préciser l'action dénudatrice des glaciers. C'est, conformément aux propres expressions de Tyndall [3], que « ceux qui ont soutenu que les glaciers creusent les vallées n'ont jamais dit, ni voulu dire, que ce fût le *bec* du glacier qui agît dans ce cas. Pour le glacier de Morteratsch, le travail de creusement, qui s'effectue certainement dans des proportions plus ou moins grandes, doit être bien plus au haut qu'au bas du glacier. »

La ressemblance d'allure entre les glaciers et les rivières se continue dans la ressemblance d'effets érosifs produits.

La forme du sol est analogue, quoique caractérisée, et ses modifications sont comparables.

Parmi les plus intéressantes, je signalerai ici celle qui consiste dans la *capture* des glaciers.

Ce sont les expériences sur l'usure des roches par des poussières pierreuses qui ont conduit M. Stanislas Meunier à la notion de la capture des glaciers [4]. Elle

1. *Les Glaciers*, p. 122.
2. *Essai sur les glaciers*, p. 38.
3. *Les Glaciers*, p. 95, Biblioth. scient. intern.
4. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CXXIV, p. 1043. 10 mai 1897. — *Le Naturaliste* du 1er juillet 1897 (avec des figures).

est de première valeur pour procurer une conception saine du phénomène glaciaire. Voici en quoi elle consiste :

Un glacier étant donné, et toutes choses restant égales d'ailleurs, il tend à diminuer de dimension, malgré les vicissitudes saisonnières, à cause de l'abaissement progressif de son bassin d'alimentation. Les matériaux qu'il charrie en si grandes quantités et que charrient avec lui les eaux qui lui sont associées, diminuent le relief du sol. Il recule donc et, derrière sa moraine frontale abandonnée, la végétation peut s'établir. Mais comparable de tous points, aux rivières, en même temps qu'il abaisse sa vallée, il fait progressivement regresser sa source et il peut arriver que cette régression, en détruisant l'arête rocheuse qui sépare son bassin de celui du glacier voisin, permette à celui-ci de se déverser sur lui. Alors, un accroissement de substance doit provoquer un retour des dimensions antérieures et dès lors les produits de fossilisation des végétaux établis sur le premier terrain glaciaire, seront recouverts d'une seconde extension morainique.

Cette disposition, si singulière à première vue, a été constatée en 1865 par Oswald Herr, qui dans son célèbre ouvrage *Urwelt der Schweiz* cherche à y voir la preuve de deux périodes glaciaires distinctes, séparées par une période interglaciaire.

Dès 1854, Morlot avait émis une idée semblable [1]

1. *Bulletin de la Société Vaudoise des sciences naturelles.*

et plus tard, en 1859, Deicke y était arrivé de son côté [1].

Allant plus loin, M. Léon du Pasquier a donné en 1891 [2] une étude des alluvions glaciaires de la Suisse où il constate en Suisse *trois périodes glaciaires successives*, qu'il ne cherche d'ailleurs pas, dit-il, à concilier avec les deux étages glaciaires du nord. Et renchérissant encore, M. James Geikie déclare qu'on trouve en Angleterre les traces d'*au moins quatre époques glaciaires* séparées par des retours de température plus clémente.

Le phénomène de la capture remplace donc des hypothèses embrouillées, par une théorie des plus simples, puisqu'elle est basée sur l'observation directe et sur l'expérience.

M. le Dr Hans Schardt, dont la compétence est bien constatée, mais qui ne saurait évidemment accepter volontiers une théorie qui contrarie aussi complètement les idées qu'il a toujours adoptées, formule contre la capture des glaciers [3] des objections qui ne paraissent pas bien solides. La principale consiste dans l'affirmation, purement et simplement renouvelée, que « les oscillations des glaciers ont été *générales* et *simultanées* ». Mais l'auteur ne dit pas comment il sait que telle a été leur allure. Il fait évidemment une confusion entre la simultanéité géologique qui se satisfait d'intervalles compris dans toute une époque pouvant avoir des milliers d'années, et la simultanéité véritable. Ces cap-

1. *Berichte der St-Gallen Naturforscher Gesellschaft.*
2. *Eclogæ geologicæ Helvetiæ*, t. II, p. 455.
3. *Eclogæ geologicæ Helvetiæ*, t. V, p. 407, 1898.

tures de glaciers ont été simultanées comme les captures de rivières, c'est-à-dire comprises dans les temps quaternaires, mais distantes les unes des autres de périodes humainement fort longues et ne se rattachant pas à autre chose qu'aux variations locales de chaque glacier considéré individuellement.

Il importe d'ailleurs d'insister sur ce fait auquel M. Stanislas Meunier a, dès le début de ses études, attaché une très grande importance, que la régression qui amène la capture n'est pas l'œuvre exclusive de la glace solide. Ne voir dans un glacier que la glace solide, c'est se comporter d'une manière antiphilosophique et se refuser à comprendre l'action de ce genre si spécial d'organes de la physiologie terrestre. A cet égard il y a lieu de répéter à peu près ce que nous disions à propos du travail des rivières où la considération exclusive du filet d'eau contenu dans le lit ne conduit qu'à des notions extrêmement incomplètes. A tous les instants, l'eau liquide ajoute sa collaboration très efficace à l'action directe des glaciers, qui d'ailleurs lui communiquent d'ordinaire, par la condensation atmosphérique qu'ils provoquent, une plus grande intensité, et dans la régression de sa source la glace solide se consacre surtout à transporter les débris séparés par les intempéries et à remettre toujours des escarpements vifs à la portée des agents atmosphériques.

La théorie de la capture des glaciers a été l'objet de la part de quelques géologues de véritables vérifications qui nous sont très précieuses, à cause des cir-

constances mêmes dans lesquelles elles se sont produites. Ainsi, par exemple, quelques mois après la publication du mémoire de M. Stanislas Meunier, un célèbre observateur anglais, sir Martin Conway, se trouvant au Spitzberg saisit sur le fait la désagrégation régressive réalisée par des glaciers[1]. C'est ce que montre, par exemple, une photographie prise par M. Garwood sur le Highway Dome, où se trouve du névé au-dessus et au-dessous d'une falaise à pic. Le diagramme publié par M. Conway coïncide exactement avec ceux que M. Stanislas Meunier avait donnés antérieurement, et le géographe de Londres ne manque pas d'appliquer ses observations au fait précis de la capture des glaciers, qui se trouve ainsi véritablement constaté de la façon la plus précieuse et sans que la priorité de l'auteur français puisse être contestée. Il en est de même d'une curieuse note de M. Willard D. Johnson, de Washington, sur *An unrecognised process in glacial erosion*[2], et dans laquelle la dénudation réalisée par les glaciers est reconnue pour avoir une allure régressive, amenant vers l'amont la constitution de falaises toujours avivées.

La conclusion générale des études expérimentales sur les glaciers, d'accord avec un très grand nombre d'observations, peut s'exprimer en disant qu'ils ont déterminé des phénomènes à allure parfaitement continue.

1. *Geographical Journal*, vol. XII, n° 2. p. 137, août 1898.
2. II[d] Annual meeting of the National geographical Society of the United States of America, in *Science* (de Londres), nouvelle série, t. IX, n° 212, p. 112, janvier 1899.

Provoqués, dans des localités diverses, par des exhaussements du sol (soulèvement des Alpes, etc.), ils ont procédé à l'usure incessante du sol et ont subi une diminution correspondante. La supposition du *synchronisme* des anciens glaciers ne saurait être démontrée.

Si, dans la même région, les différentes traces glaciaires ne sont pas synchroniques, les hauts polis étant les plus anciens, — de même il y a des localités glaciaires plus anciennes que d'autres, et la terre n'a jamais été couverte au même moment de tous les glaciers qui ont laissé leurs vertiges à sa surface.

L'usure effective des roches par les glaciers montre d'ailleurs que c'est le phénomène lui-même qui, par sa durée, a amené progressivement, en bien des lieux, la disparition des conditions qui lui sont favorables; les Vosges ayant été peu à peu réduites à leur état actuel de véritables Pyrénées qu'elles étaient — et celles-ci étant comme d'anciennes Alpes.

J'ai eu antérieurement l'occasion d'insister sur les conséquences générales de ces considérations au point de vue de l'économie réelle de la période quaternaire; il suffit aujourd'hui de montrer la part très large que la méthode expérimentale a prise à l'établissement de ces faits.

CHAPITRE V

La dénudation souterraine.

La dénudation souterraine, c'est-à-dire la démolition et la dissolution des roches par les eaux d'infiltration, et à une distance plus ou moins grande au-dessous de la surface terrestre, a fourni la matière d'un très grand nombre d'expériences.

Tout d'abord, l'allure des nappes aqueuses souterraines peut être étudiée par le procédé expérimental. On a su les suivre et les retrouver à leur émergence en y mêlant des matières caractéristiques comme la fluorescine. Des expériences accidentelles ont aussi éclairé le sujet.

Dans cette direction, une première notion sur le mouvement souterrain des eaux et sur l'existence de conduits associés à la simple porosité des roches, résulte de la découverte qui a été faite maintes fois d'objets charriés par les eaux souterraines.

Ainsi, à Tours, à la fin de janvier 1830, on reconnut que le puits de 110 mètres foré en 1829 dans la craie inférieure avait amené beaucoup de *sables fins* et des

fragments d'épines, graines de plantes marécageuses (*Galium uliginosum*). Avec ces vestiges, se montraient des coquilles telles que *Planobis marginatus*, *Helix rotundus*, *H. striatus*, d'ailleurs non altérées, et qui devaient avoir accompli leur trajet en trois ou quatre mois.

Les puits artésiens permettent aussi de vraies expériences sur le régime des nappes souterraines, et donnent le moyen d'en étudier l'allure. L'une des plus curieuses concerna la réaction exercée en 1861 par le forage de Passy sur le débit du puits de Grenelle [1].

La distance qui sépare ces deux forages est de 3500 mètres. Au bout de trente heures, le puits de Grenelle a commencé à baisser; de 630 litres à la minute, il est descendu à 560, puis à 540. Pendant trente heures il est resté stationnaire à 540. Puis pendant soixante-douze heures à 500 litres par minute. Plus tard il ne donnait plus que 470 litres.

Sans entrer ici dans des détails sur les rapports mutuels des terrains perméables et des terrains imperméables et sur le régime des nappes d'eau, nous devons noter qu'on a fait de nombreuses expériences sur le jaillissement des puits artésiens.

Elles y ont fait voir, avec Delaunay, un phénomène dynamique, et non pas statique, comme on l'a cru si longtemps, ainsi qu'en témoigne la comparaison des bassins artésiens avec l'appareil de physique dit des vases communiquants. La nappe souterraine cède à un déplacement continu et son écoulement, facile à imiter

1. Voyez une note de Dumas, C. R., LIII, 571, 1861.

artificiellement, amène dans le régime des gerbes jaillissantes des conditions toutes nouvelles. Ces recherches montrent aussi que, dans la plupart des cas au moins, il n'y a aucune raison pour penser avec M. Hay [1] que la pression des roches peut être la cause du jaillissement de l'eau dans certains puits artésiens. Cela ne pourrait intervenir que dans les cas où les roches superposées à la nappe aquifère seraient coulantes, c'est-à-dire auraient perdu leur cohésion.

M. William Harmon Norton, dans le tout récent VIe volume du *Iowa geological Survey* [2], décrit une expérience qui montre selon lui l'action exercée par la friction de l'eau sur les grains de sable, quant à la hauteur du jaillissement des puits artésiens. Mais il nous faut convenir que nous avons répété ces essais sans obtenir les mêmes résultats.

Dans tous les cas, la circulation souterraine des eaux détermine des phénomènes de dénudation très importants qu'on peut rattacher, les uns au travail vertical des eaux d'infiltration, les autres à leur travail horizontal.

Le travail vertical des eaux d'infiltration.

Le travail vertical des eaux d'infiltration peut prendre, suivant les cas, les deux formes principales suivantes :

1° Soustraction de matière dissoute ou délayée en présence de roches mobiles qui comblent le vide au fur et à mesure de sa formation ;

1. *Congrès de Washington*, en 1893.
2. V. p. 131.

2° Soustraction de matière avec production de cavités plus ou moins durables.

Il convient de les examiner successivement.

L'étude expérimentale des phénomènes de la dénudation souterraine a conduit M. Stanislas Meunier à la constatation d'un fait dont les conséquences paraissent devoir être dignes de considération pour l'histoire de la période quaternaire.

Il s'agit d'un mode de striage de roches et de galets, donnant des produits tellement comparables à ceux qui résultent du phénomène glaciaire qu'on les a ordinairement confondus avec ces derniers. Cette confusion a eu des conséquences bien plus graves qu'on ne se le serait imaginé, en faisant considérer comme dues à une vaste extension de glaciers maintenant fondus, des formations très épaisses et très répandues, dont l'origine est complètement différente.

Quand un terrain se compose de matériaux clastiques très divers, comme des gros galets calcaires polis et des grains de quartz plus ou moins anguleux, la dénudation souterraine, c'est-à-dire la soustraction lente et progressive de certaines parties dissoutes ou délayées, a pour effet nécessaire un tassement du résidu, et ce tassement, accompagné de déplacements relatifs des masses en présence, produit à la surface des galets ou des roches sous-jacentes, des paquets de stries dues aux grains quartzeux et qui font de ces pierres rayées comme des fac-similés de certains produits glaciaires.

L'appareil mis en usage par M. Stanislas Meunier au

Muséum (fig. 16) consiste en une table C inclinée de 30 à 45 degrés, suivant les besoins, et sur laquelle on a accumulé des graviers diluviens, mélangés ou non de sable, et supportant une dalle de calcaire D polie, sur laquelle un poids P d'une vingtaine de kilogrammes a été assujetti. Un jet d'eau E attaquant le tas de gra-

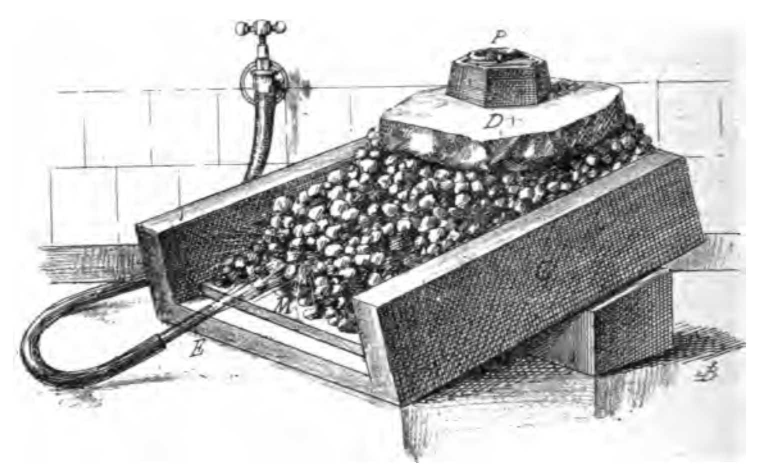


Fig. 16. — Imitation artificielle des roches et des galets striés par voie de dénudation souterraine.

vier par sa partie inférieure en a déterminé l'écroulement et la dalle surchargée a glissé suivant la pente. On a constaté, à sa surface inférieure, des paquets de stries parallèles au déplacement qui y avaient été creusées par le gravier. Dans bien des cas il y a eu rotation de la dalle et production de stries en sens divers.

Une autre disposition a consisté à établir à poste fixe une dalle calcaire M sur la table inclinée et à la recouvrir de galets supportant une planche convena-

blement surchargée. Cette fois, l'écroulement aqueux a fait glisser les galets sur la dalle qui a été striée.

Enfin, pour borner nos exemples, on a mélangé des galets calcaires, et même des billes à jouer, aux graviers et on a constaté, après l'écroulement sous une charge suffisante, que ces galets ou que ces billes sont striés.

Ces expériences, que l'auteur a variées beaucoup, paraissent susceptibles d'applications à différents phénomènes naturels. Avant tout, elles doivent nous inviter à la prudence, quand il s'agit de décider l'origine d'un terrain à cailloux striés.

A cet égard, il a étudié spécialement les énormes revêtements de semblables terrains qu'on rencontre dans une foule de vallées, le long des Préalpes vaudoises, et dont les analogues se retrouvent en beaucoup d'autres pays. Ainsi, dans la vallée de la Baie de Clarens, vers le Sex que Pliau, au lieu dit En Saumont, et dans la vallée du Chauderon, un peu en deçà des Avants, on voit sur des coupes fraîches, des centaines de mètres de ces accumulations qui sont qualifiées partout et sans hésitation de terrain glaciaire.

A première vue, on peut avoir quelques scrupules quant à leur origine, à cause même de l'abondance des stries dont sont recouverts en tous sens les galets calcaires qui les composent, en association avec les matériaux sableux et boueux. Jamais, dans aucune moraine *actuelle*, on n'a vu tant de stries : la grande majorité des blocs a été portée sur la glace et n'est pas striée. Les galets striés ne le sont pas non plus d'habitude avec une pareille profusion; ils ont des

stries de quelque côté plus que d'autres, dans deux ou trois directions tout au plus. Ici, au contraire, non seulement *tous* les galets sans exception sont striés, mais ils le sont sur *toutes* leurs faces avec une égale intensité et dans *toutes* les directions.

Il faut cependant se rappeler que pour être strié, un bloc entraîné par un glacier doit occuper une situation très exceptionnelle : il faut, de toute nécessité, qu'il soit *sous la glace, au contact du fond rocheux* qui supporte le fleuve solide. Évidemment cela ne peut être le cas que pour une faible minorité des fragments transportés. Dans les accumulations naturelles des cailloux des préalpes, c'est, disons-nous, tout le contraire : *tous* les galets y sont striés.

Aussi, à la suite d'études continuées pendant plusieurs années, l'auteur n'hésite-t-il plus à attribuer au terrain caillouteux, faussement dit glaciaire, des Préalpes vaudoises et des pays analogues, l'origine suivante : des épanchements boueux, du genre de ceux que nous étudierons prochainement et qui peuvent être consécutifs à la disparition des glaciers datant de l'époque où le relief du sol était plus considérable qu'aujourd'hui, ont constitué, sur le flanc des montagnes, d'épais revêtements, contrastant par l'absence de triage de leurs éléments constituants avec les dépôts aqueux et ressemblant d'autant au contraire à une formation morainique.

Une fois constitués, ces placages boueux ont subi les effets de la dénudation aqueuse, et, avant tout, la dissection intime que déterminent dans les roches la

pénétration et la circulation des eaux sauvages. Il en est résulté des suppressions progressives de matériaux solubles ou entraînables et, comme conséquence, des tassements intéressant successivement toutes les parties de la formation. A ces tassements correspondaient nécessairement des glissements relatifs des parties juxtaposées, et la surface très délicate des galets calcaires en a reçu de vrais stéréogrammes, consistant dans des stries représentant le sens et la durée de chaque mouvement. Des rotations lentes, dues à des attaques inégales, ont ajouté, en sens divers, de nouveaux paquets de stries à ceux déjà existants et, de proche en proche, les choses ont pris l'aspect que nous leur voyons aujourd'hui.

Il est intéressant de faire remarquer que, même dans du terrain incontestablement glaciaire, les stries de certains galets peuvent avoir encore l'origine qui dépend du phénomène de dénudation souterraine : c'est même nécessaire d'y insister, parce que la découverte de ces stries dans de vraies moraines est de nature, plus que toute autre chose, à tromper sur leur nature réelle.

Ces moraines, telles que celles qui barrent tant de vallées dans les Vosges, où elles datent des temps quaternaires, ont justement la constitution du terrain caillouteux préalpin. Ce sont des blocs de toutes tailles jetés sans ordre dans du sable et dans de la boue. Or le phénomène de soustraction de particules par les eaux d'infiltration s'y est exercé aussi activement que dans les placages vaudois; les effets ont

donc dû être les mêmes et ces stries ramassées en pleine moraine ne sont pas pour cela des stries glaciaires.

Ajoutons qu'on a retrouvé des galets striés dans bien d'autres formations, telles que le diluvium parisien. Dans la séance du 7 mars 1870, MM. Roujou et Julien, annonçant à l'Académie des sciences qu'ils avaient trouvé des blocs de roches striées dans le diluvium de Paris et environs et, par exemple, des grès, des meulières, des calcaires, Route de la Révolte, Avenue de Clichy, Porte de Montreuil, à Choisy-le-Roi, à Villeneuve-Saint-Georges et ailleurs, ils ajoutaient : « Nous ne serions pas éloignés d'attribuer à ces stries une origine glaciaire [1]. »

C'est même à propos de cette communication qu'Élie de Beaumont fit alors cette remarque très spirituelle [2] : « Qu'il serait heureux de voir qu'on ait fini par observer des sillons et des stries sur les roches des environs de Paris. De leur présence bien constatée, il aurait cru pouvoir déduire un moyen de *réduction à l'absurde*, applicable à la supposition que les sillons et les stries seraient toujours l'ouvrage des glaciers et un témoignage de leur ancienne existence. »

Ajoutons que si, dans le terrain boueux du canton de Vaud, les faits qui viennent de nous occuper se présentent avec beaucoup plus de netteté et d'intensité que dans le diluvium parisien, cela vient avant tout

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXX, p. 539, 1870.
2. *Loc. cit.*, p. 539.

de deux causes principales. D'abord, les galets calcaires sont infiniment plus sensibles que les galets siliceux au phénomène du striage; ils sont plus tendres et leur surface est beaucoup mieux polie. En second lieu, l'épaisseur des boues alpines est incomparablement plus grande que celle des lambeaux quaternaires des bords de la Seine; dès lors les pressions réalisées par les tassements sont beaucoup plus intenses et s'exercent plus régulièrement.

En résumé, les expériences et les observations dont on vient de donner un très succinct résumé paraissent justifier dès maintenant les conclusions suivantes :

1° Les tassements et les glissements caillouteux consécutifs à la dénudation souterraine, peuvent donner lieu à des stries, soit sur des galets, soit sur les roches qui supportent des galets, soit sur des dalles glissant sur des galets. C'est en somme une autre forme du phénomène qui a déterminé, dans d'autres conditions, la production des *miroirs* dans les failles.

2° Il paraît nécessaire d'attribuer au mode de formation dont il s'agit les stries observées à diverses reprises sur des galets, par exemple auprès de Paris dans le quaternaire, par M. Julien et par M. Roujou, — dans le terrain ancien de l'Afrique du Sud (conglomérat de Dwyka) par M. Dunn; — celles qui ont été citées par Belgrand et par Collomb sur des dalles de grès en place, à la Padole et à Champcueil (Seine-et-Marne); — celles enfin de gros blocs pierreux, tels que

celui qui a été décrit à Gentilly (Seine) par M. Stanislas Meunier[1] et qui est conservé au Muséum.

3° Enfin, il y a lieu de ne pas qualifier un terrain de glaciaire, pour cela seul qu'il renferme des blocs striés ou qu'il repose sur des roches striées, sans s'être assuré, au préalable, que les stries ne peuvent pas provenir du mécanisme qui vient d'être exposé.

Nous n'avons évidemment pas à nous attarder à répondre à des objections du genre de celle que formulait Collomb[2], après avoir étudié des blocs éboulés sur les pentes et qui se sont éraflés. Leurs rayures ne coïncident à aucun degré avec celles que nous étudions ou avec les stries vraiment glaciaires.

En somme, l'expérimentation est venue nous démontrer d'une manière incontestable qu'Agassiz[3] a affirmé beaucoup trop vite que « partout où l'on trouve des galets rayés, on a affaire à des accumulations de débris glaciaires ».

Les études expérimentales sur la dénudation glaciaire conduisent encore à une remarque très importante et que nous ne saurions passer sous silence. Elle concerne la prudence qu'il faut apporter dans la détermination de l'âge du ravinement de couches recouvertes.

Ainsi, dans les Flandres, on rencontre, en beaucoup de localités, la craie blanche ravinée recouverte de

1. *La Nature* du 23 septembre 1893.
2. Matériaux pour l'étude des glaciers, par Dollfus-Ausset. *Phénomènes erratiques*, p. 249.
3. Cité par Collomb, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XX, p. 1717-1845.

sables incontestablement tertiaires et qui parfois sont assez épais. On en a conclu généralement que ces sables se sont déposés sur la craie ayant déjà subi la corrosion que nous montre sa surface supérieure. Les faits procurés par des expériences de laboratoire apprennent qu'un bloc de craie, recouvert de sable arrosé d'eau acidulée, se ravine exactement comme s'il était à découvert; de sorte que le prétendu ravinement *prétertiaire* des Flandres peut parfaitement être beaucoup plus récent; quaternaire, par exemple. La seule condition pour que l'hypothèse soit admissible est que le terrain superficiel considéré ne contienne pas de calcaire et soit par conséquent dépourvu de fossiles. On conçoit toutefois qu'en certains cas il aura pu, à une époque postérieure, recevoir des infiltrations calcaires qui se traduisent soit par une cimentation, soit par la production de nodules ou autres concrétions par des processus que nous aurons à examiner.

Cette remarque peut se répéter pour la craie de Picardie ravinée sous les tufs et sous les sables phosphatés, dont nous aurons à nous occuper un peu plus loin. Elle se représenterait aussi pour le calcaire grossier de Paris raviné, recouvert par le diluvium, et pour une infinité d'autres exemples.

Toutefois, au lieu de les énumérer ici, nous remettrons de les décrire au moment où nous traiterons de la sédimentation souterraine, et l'on verra en effet que les deux sujets sont intimement unis entre eux. Disons seulement qu'on a des preuves de l'exercice de la dénudation souterraine, à des époques géolo-

giques très différentes et, que les caractères qu'elle a imprimés au sous-sol de bien des régions permettra de reconnaître et de mesurer des périodes de régime continental qui jusqu'à présent ont bien peu fixé l'attention[1].

Dans les cas où la dénudation souterraine s'accompagne de la perforation de cavités, la forme la plus ostensible du travail réalisé est connue sous le nom de *puits naturels.* Il s'agit de perforations plus ou moins verticales qui traversent les terrains calcaires et qui sont spécialement fréquentes dans le calcaire grossier, dans la craie, dans les couches jurassiques de divers âges. Parfois, elles sont prodigieusement abondantes et on remarque alors que la pierre qui les sépare est comme pourrie et impropre à tout usage.

L'origine de ces accidents, désignés parfois sous le nom d'*orgues géologiques* et qualifiées de *pot-holes* par les Anglais, de *aerde-pyp* par les Hollandais, etc., a été l'objet de diverses hypothèses, et d'abord on l'a rapprochée de celle des marmites de géants, pour y voir le résultat d'une sorte spéciale de taraudage réalisé par des eaux tourbillonnantes. Lyell s'est élevé contre cette interprétation, et il a montré qu'on la doit rejeter, en constatant la saillie parfois considérable que font les silex sur la paroi de beaucoup de puits naturels traversant la craie, par exemple à Eaton, près de Norwich, en Angleterre.

1. On peut voir, à cette occasion, la note insérée par M. Stanislas Meunier dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CXXVII, p. 1041, 12 déc. 1898.

Les expériences ont précisé tout le détail du mécanisme de la perforation, et à ce titre il est intéressant, au point de vue purement historique, de noter les essais déjà tentés par Bory de Saint-Vincent [1], pour imiter les puits naturels dont est si richement perforée la montagne de Saint-Pierre auprès de Maestricht, en Hollande. « Après avoir examiné ces divers phénomènes, dit-il (p. 251), j'essayai de rivaliser avec la nature et de faire aussi des tuyaux d'orgue géologiques. »

Son procédé est d'ailleurs un peu naïf, à cause des substances employées et dont la comparaison avec des roches peut prêter à des objections; mais le résultat en est très net. L'auteur taille un prisme « dans un pain de sucre », puis il fait tomber sur l'une de ses faces, tenue horizontalement, un petit filet d'eau conduit par un tube capillaire. Il voit une perforation se produire et prendre peu à peu, avec une exactitude remarquable, tous les détails de forme des puits à imiter. Ayant mis une surchage sur le sucre, Bory le vit, à la suite de la dissolution, subir un effondrement tout à fait comparable à ceux que présentent diverses parties de la montagne de Saint-Pierre et il en tire des conclusions qui sont généralement acceptées à présent.

M. Stanislas Meunier, à qui d'ailleurs le travail de Bory de Saint-Vincent était alors inconnu, a repris cette question et il a fait une série d'expériences, dont les résultats ont été exposés dans plusieurs notes sou-

1. *Annales générales des sciences physiques et naturelles*, t. I, p. 186 et Pl. IX, Bruxelles, 1819.

mises à l'Académie des sciences [1]. Il a opéré sur des roches calcaires, afin de se rapprocher des conditions naturelles; mais, pour gagner du temps, il a remplacé les dissolutions d'acide carbonique, dont le maniement est moins commode, par des dissolutions convenablement étendues d'acide chlorhydrique. Le liquide corrosif était amené par un tube fin sur la dalle de roche, dans des conditions qui ont d'ailleurs varié beaucoup d'une expérience à l'autre. La fig. 17 indique le dispositif expérimental adopté. L'appareil consiste en un flacon F dans lequel on envoie l'eau d'un robinet R qu'on additionne d'une très petite quantité d'acide chlorhydrique. Ce liquide arrive par le tube t

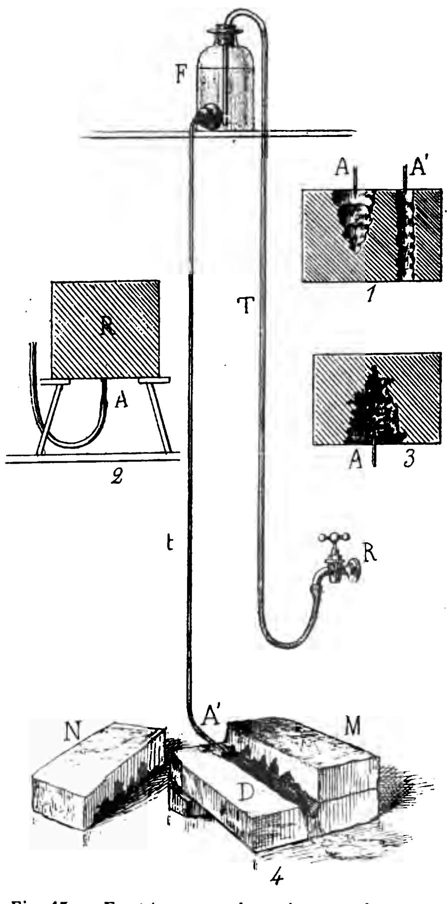


Fig. 17. — Expériences sur les puits naturels et les cavités analogues.

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séances du 29 mars 1875, du 10 juillet 1876 et du 26 février 1894.

au contact d'une masse calcaire A qu'il s'agit d'attaquer.

Le premier cas, souvent réalisé, par exemple, dans la craie et dans le calcaire grossier, concerne des perforations en pleine masse de roche non fissurée. C'est ce que montre le détail n° 1 de la figure. On a observé d'abord la production d'une petite cavité plus ou moins hémisphérique, au point d'arrivée du liquide. En continuant la corrosion, on a vu la perforation s'approfondir bien plus vite qu'elle ne s'élargissait et prendre la forme d'un cône à pointe dirigée vers le bas (n° 1, A), souvent assez long dans des roches convenables et spécialement dans la craie pour devenir sensiblement cylindrique (n° 1, A′), abstraction faite de la portion la plus inférieure.

La ressemblance de forme de la cavité obtenue avec celle de bien des puits naturels, est des plus frappantes et elle s'est continuée jusque dans des particularités très délicates.

Avec un certain régime de l'eau, une certaine concentration de liquide corrosif et une certaine qualité de la roche attaquée, on a vu se faire des portions plus coniques que précédemment et offrant les analogies les plus intimes avec les poches dans lesquelles on exploite tant de substances utiles, comme le minerai de fer en grains, la bauxite, les phosphorites concrétionnées du Quercy, le sable phosphaté des environs de Mons, de Doullens, d'Hardivilliers. On a dû en conclure que ces perforations naturelles ne peuvent résulter que d'un travail réalisé de haut en bas par

l'eau souterraine et nous aurons, dans une autre partie de cet ouvrage, à insister sur l'importance de cette remarque. Les abîmes du Creux-Percé, près de Dijon, et de Peyraou de Rouveyrols (Ardèche) sont à rapprocher de ce type.

Si l'on continue l'expérience jusqu'à ce que la perforation complète de la dalle attaquée soit complète, on voit des faits nouveaux se présenter. Le conduit, après être resté un moment cylindrique, s'élargit inégalement dans les divers points de sa hauteur : l'usure se fait surtout en bas et il prend une forme qu'on peut comparer à celle d'une bouteille. Des cavités naturelles reproduisent cette particularité et on peut citer, par exemple, l'aven de l'Ègue, dans le Causse Noir, dont M. Martel a donné la description[1]. Il faut y insister un moment pour montrer que c'est le même mécanisme qui donne successivement la cavité en entonnoir au début, la cavité en cylindre qui lui succède et la cavité finale en bouteille. Au commencement, la liqueur corrosive, telle que l'eau carboniquée, arrivant au contact du calcaire, agit nécessairement surtout à la surface, le fond étant protégé par la solution de bicarbonate de chaux qui séjourne sur lui. Aussi l'approfondissement est-il relativement lent. S'il se fait régulièrement, la forme conique va nécessairement en s'atténuant dans les parties supérieures, qui deviennent cylindriques, et se conserve exclusivement vers le fond. Mais, au moment de la perforation,

1. *Les Abîmes*, p. 204.

tout est changé, par ce seul fait que l'eau contenue dans la cavité n'est plus stagnante : elle peut s'écouler par le bas; alors elle ruisselle rapidement sur les parois et c'est en bas seulement qu'elle est efficace. Aussi l'élargissement commence-t-il en bas et se propage-t-il peu à peu en remontant.

On voit dans cette remarque la réponse à une objection qui avait été faite par MM. de Launay et Martel [1] à la conclusion de M. Stanislas Meunier, que les poches à pointe inférieure ont été creusées par des eaux agissant de haut en bas sans aucune exception possible. Et c'est la réponse en même temps à des observations un peu plus anciennes de M. de Grossouvre dans le même sens [2].

Mais il ne faut pas oublier qu'on rencontre dans la nature des poches coniques à pointes supérieures, méritant la comparaison, non plus avec un entonnoir, mais avec un éteignoir. Ainsi, dans les grottes de Baumes-Chaudes, on connaît des accidents de ce genre, et dans un grand nombre d'autres localités. M. Stanislas Meunier est parvenu également à les imiter synthétiquement en faisant agir le liquide corrosif, poussé de bas en haut, à la face inférieure d'une dalle de calcaire. L'appareil représenté au n° 2 de la figure 17 suffit à faire comprendre le mode opératoire.

Les résultats produits (n° 3) ont une analogie intime

1. *Bulletin de la Société géologique de France*, 3e série, t. XIX, p. 142, 1890.
2. *Ibid.*, 3e série, t. XVI, p. 294, 1888.

avec beaucoup de cavités naturelles, et expliquent par exemple, l'association, dans les cavernes des environs des Baumes-Chaudes, des éteignoirs aux puits naturels ordinaires. On voit de tous côtés des eaux ascendantes réaliser les effets qui nous occupent et on peut au même mécanisme rattacher l'origine des *estavelles*. Par exemple, Fournet note qu'après les grandes pluies du 29 juillet 1851, on vit dans le Jura, aux environs de Chorance, dans la vallée de la Bourne, à 200 mètres au-dessous du sommet de la montagne de Cournont, jaillir une énorme fontaine qui décrivait une courbe majestueuse dans l'espace. L'eau souterraine avait corrodé les calcaires situés *au-dessus* d'elle, à moins qu'elle n'ait débourré d'anciens conduits remplis d'argile. Dans le vieux puisard romain de Bourbonne-les-Bains, on constata, sur les blocs calcaires du parement, des corrosions dues à l'eau ascendante et qui avaient sans exception la forme caractéristique en *éteignoir*.

Mais on n'aurait du sujet qu'une idée incomplète si l'on ne considérait que les cavités ouvertes par l'eau en pleine masse de roche, c'est-à-dire dans des blocs non fissurés. Le cas le plus fréquent est au contraire celui où les couches du sol ont été tout d'abord traversées par les cassures souterraines, connues sous les noms de joints et de failles et qui présentent au liquide souterrain des lignes directrices.

M. Stanislas Meunier a fait, encore dans cette voie, de longues séries d'expériences. Une dalle de calcaire placée horizontalement étant réduite à coups de

masse en trois ou quatre fragments par deux fissures se recoupant mutuellement, on rapproche les débris et on dirige, sur la ligne d'intersection des fissures, un courant d'eau acidulée. La dalle est soutenue de façon que le liquide corrosif, après avoir circulé dans toute l'épaisseur de la pierre, s'écoule sans difficulté.

Après quelques jours de ce régime, on trouve le calcaire traversé par un conduit vertical dont tous les détails de forme coïncident avec ceux qui ont été décrits dans les avens des Causses et dans les gouffres d'autres régions calcaires. Au commencement, quand la circulation de l'eau est difficile dans la fissure étroite, le conduit est plus large en haut qu'en bas; il est en entonnoir. Mais quand il a acquis une certaine largeur et que le liquide s'y déplace très facilement, on voit le diamètre inférieur gagner rapidement. Bientôt l'ensemble a la forme de deux cônes réunis par leur sommet, la forme dite en *sablier*; le cône inférieur gagne en hauteur peu à peu au détriment du cône supérieur, et à la fin on passe à l'éteignoir.

La figure 17, n° 4, montre le résultat obtenu et on peut y voir en même temps sur la dalle monolithe et placée sous les fragments, un sillon creusé par l'eau acidulée qui reproduit dans tous ses caractères les cours souterrains des rivières, c'est-à-dire les cavernes; nous y reviendrons dans un instant.

C'est dans le développement de ces expériences qu'ont pu être tout à fait élucidés de nombreux faits concernant l'action directrice des joints sur les puits naturels et les autres perforations plus ou moins ver-

ticales. Une foule de particularités observées dans l'exploration des gouffres ont été imitées dans tous leurs détails.

Des jets ascendants de liquide corrosif ont pu être lancés dans des fissures plus ou moins verticales et on a revu les entonnoirs déjà mentionnés tout à l'heure,

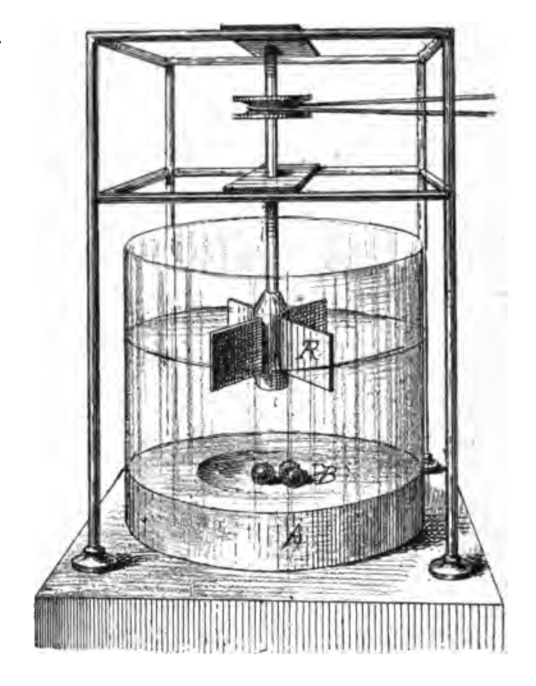


Fig. 18. — Appareil propre à la production expérimentale des marmites de géants.

et bien d'autres détails qui seront d'ailleurs mieux à leur place à propos du travail horizontal des eaux souterraines.

Dans les cavernes comme dans le lit de maint torrent se présentent souvent ces accidents caractéristi-

ques connus sous le nom pittoresque de *marmites de géants*. La fig. 18 représente l'appareil qui a permis à M. Stanislas Meunier de les imiter et dont on a eu la description page 68. C'est un vase cylindrique plein d'eau dont le fond est tapissé d'argile A et où une roue à palettes verticales R, actionnée par une petite turbine, permet de produire un tourbillon qui entraîne quelques billes B dans son mouvement de rotation. Ces billes ne tardent pas à creuser dans l'argile des cavités cylindroïdes dont les formes rappellent celles des marmites de la nature.

Le travail horizontal des eaux d'infiltration.

La forme la plus visible du travail horizontal de dénudation réalisé par les eaux souterraine consiste dans l'ensemble des cavernes, parmi lesquelles figurent nécessairement les lits souterrains des rivières. Les observateurs en ont décrit les caractères en détail et la principale conclusion, déjà mise en évidence par Desnoyers, est la ressemblance intime des cavernes avec les gorges de torrents, ces *cavernes à ciel ouvert*, selon l'heureuse expression qu'il a adoptée. Il résulte de là que les expériences relatives au creusement des vallées étroites peuvent souvent s'appliquer, presque sans variante, à l'histoire des cavernes, et c'est ce que nous constations à la fin du précédent paragraphe, puisque nous remarquions, au-dessous d'une crevasse verticale directrice et à la surface d'une dalle sous-jacente, la production par l'eau corrosive d'un sillon

ayant avec les cavernes les ressemblances les plus intimes.

Un bloc de calcaire ayant été fendu en deux par une fissure verticale qu'il maintient très étroite, M. Stanislas Meunier les dispose sur une dalle bien plus large et non fissurée, inclinée plus ou moins à l'horizon (V. n° 4 de la fig. 17). Du côté d'amont, on fait arriver plus ou moins horizontalement dans le plan de la fissure un filet d'eau acidulée. Au bout d'un temps convenable, la cassure s'est élargie sous forme de vraie caverne et la grande dalle se creuse d'un sillon qui se prolonge dans la partie découverte, de façon à imiter un vrai *canion*.

D'innombrables essais ont procuré les reproductions des cavernes les plus célèbres et l'état des parois s'est trouvé identique dans les expériences et dans la nature. On mentionnera l'association aux cavernes des marmites des géants et des corrosions cylindroïdes, comme on en voit par exemple à la chute de Trummelbach dans le canton de Berne, dans la grotte de Bramabiau, d'après M. Mazauric[1], et bien ailleurs.

Un point très important, qui résulte de l'application du procédé expérimental, c'est l'allure extrêmement progressive du creusement des cavernes. Et à cet égard nous aurions à répéter tout ce que nous disions à propos du creusement des gorges de torrents, c'est-à-dire des vallées.

Des résultats synthétiques font ressortir cette allure

1. *Les Abîmes*, de M. Martel, p. 192.

progressive dans le phénomène naturel et montrent, par exemple, comment la roche qui fait les parois de la caverne, subit une dissection très délicate qui laisse à chaque lit une saillie intimement liée à son coefficient de solubilité. Des corniches superposées se constituent très aisément avec diverses roches convenablement choisies et reproduisent une particularité signalée, par exemple, dans le couloir de la rivière du sud à Bramabiau (Gard). On a noté aussi, dans la grotte d'Arcy-sur-Cure, des particularités qui démontrent l'allure très progressive du creusement.

Enfin les expériences ont procuré à M. Stanislas Meunier l'imitation de divers faits remarquables sur la variation de sources qui ne sont que les débouchés au jour de rivières souterraines, en certains pays. Il s'agit ici d'une vraie *capture verticale* des cavernes aquifères comparables, sauf la direction, qui est rectangulaire avec elle, à la capture des cours d'eau. Au fur et à mesure du creusement, de nouveaux conduits peuvent offrir à l'eau un dégagement plus facile, et alors les conduits supérieurs sont délaissés.

Cette particularité si fréquente, à laquelle on doit attribuer des disparitions et des apparitions de sources, est liée naturellement à l'influence des cassures des roches sur la production des cavernes. Celle-ci est identique à celle que nous signalions à l'égard des puits naturels. Et pour avoir une idée générale du phénomène de la dénudation, il ne faut pas oublier l'étroite parenté des puits naturels avec les cavernes. Les cours souterrains de Padirac, de Vigne-Close, et

bien d'autres, montreraient à cet égard l'efficacité des puits. L'exemple déjà rappelé des Baumes-Chaudes est des plus typiques, pour faire voir la complexité que le phénomène peut présenter.

Enfin il faut rappeler, et l'expérience comme on l'a vu, en a souvent reproduit les détails, la liaison des cavités souterraines du sol avec le réseau superficiel des rivières subaériennes. La disparition et les réapparitions de rivières fournissent à cet égard un grand nombre de modèles, que l'expérimentateur peut se proposer de reproduire et dont plusieurs ont procuré déjà des résultats satisfaisants.

Il est très remarquable que l'étude expérimentale de la dénudation souterraine ait permis de rattacher à ses contre-coups certains détails de la forme extérieure du sol; et c'est un point qu'il importe de préciser.

Dans une foule de cas, la circulation souterraine de l'eau, en délayant des roches, détermine le glissement des masses superposées. La catastrophe du Rossberg en Suisse, en 1806, celle du Piton des Neiges à l'île de la Réunion, en 1875, sont classiques. Plus récemment, nous avons eu le glissement de la Grand'Combes près d'Alais, le 18 février 1896.

C'est pour éclairer cette catégorie de phénomènes que Collin avait fait, il y a déjà cinquante ans, des expériences qu'il nous faut mentionner [1].

Il employait un chariot convenablement chargé, glissant sur des argiles sous l'influence d'un poids

1. *Expériences sur les glissements des terrains argileux*, par Alex. Collin, ingénieur des Ponts et Chaussées, 1846, in-4, avec Atlas.

connu. Sa conclusion c'est que : « Le rapport du frottement à la pression diminue à mesure que la pression augmente; les surfaces en contact demeurant à peu près dans le même état physique pendant l'expérimentation. » Dans ce mémoire, que nous ne pouvons que mentionner, les glissements de terrain à la suite de certains travaux, soit de déchaussement, soit de surcharge, sont expliqués d'une façon complète. Et l'on en doit faire une application directe aux talus de chemins de fer ou de canaux, sujets à glisser quand on ne s'est pas suffisamment inspiré des profils naturels.

Un célèbre exemple est celui du remblai de Halton, de 16 mètres de haut, sur le chemin de fer de Leeds à Selby, qui, quoique revêtu d'un pavé, se gonfla et prit des ondulations.

M. Stanislas Meunier a employé, pour l'étude des glissements, un appareil consistant en un plan incliné qu'on peut recouvrir de pâtes argileuses surchargées de poids plus ou moins considérables. La pente et la charge, pour chaque nature de roche, sont reliées ensemble de façon à rappeler la liaison indiquée plus haut entre la vitesse et la charge dans les expériences de striation.

A la suite de ces simples glissements, il convient de mentionner des effondrements verticaux du genre de ceux dont Fournet a enregistré un grand nombre pour la région du Jura, et dont quelques-uns ont déterminé la disparition d'habitations et des accidents de personnes. Sur une échelle plus grande, des lacs ont certainement la même origine, et c'est, par

exemple, le cas pour celui des Tallières, dans le canton de Neuchâtel, au fond duquel on voit encore des sapins debout et qui, d'après des documents authentiques, a pris naissance en 1487, pour s'augmenter en 1515.

Mais il est deux autres formes de ces mêmes phénomènes que l'expérience permet d'imiter et par conséquent d'expliquer, ainsi que M. Stanislas Meunier a eu l'occasion de le constater. Le premier concerne l'origine de vallées fort singulières, parce qu'elles sont sèches en tout temps, c'est-à-dire dépourvues de tout cours d'eau; — l'autre a trait à des banquettes disposées sur le flanc de maintes vallées et connues en plusieurs régions sous le nom de rideaux.

Comme types bien connus de vallées sèches en pays très perméable, on peut citer les vallons à profil si adouci qui sillonnent, aux environs de Paris, les forêts qui, comme celles de Meudon et de Montmorency, poussent sur les sables de Fontainebleau.

Pour les imiter, voici comment on opère : une dalle de calcaire grossier étant convenablement inclinée, on la recouvre d'une couche de quelques centimètres de sable bien uniforme et qu'on maintient à l'aide d'un cadre en bois prenant exactement la dalle, de façon à constituer comme une caisse dont le calcaire fait le fond. Avec le tube de l'appareil représenté fig. 17, n° 4, on fait arriver un filet d'eau acidulée sous le sable et au contact de la dalle, dont il suit, en s'écoulant, la ligne de plus grande pente. Peu à peu on voit, à mesure que la corrosion se poursuit, le sable s'affais-

ser suivant la rigole produite de façon à la reproduire véritablement à la surface, tout en en adoucissant le profil. En présence de ce résultat, il est naturel de supposer que les choses se passent de même dans la nature, et que les vallées sans eau ne sont que le contre-coup d'une érosion subie par la roche imperméable qui supporte le sable dont leur sol est composé.

C'est en répétant et en variant ces expériences et surtout en les prolongeant, qu'on voit souvent le sable se débiter en gradins qui glissent un peu à droite et à gauche du thalweg, les uns par rapport aux autres, de façon à reproduire l'apparence des rideaux. Ils ne sont bien visibles qu'avec des sables un peu gras, qui s'agglutinent de façon à avoir une consistance plus ou moins comparable à celle de la craie, au lieu d'être friables et mobiles comme le sable sec. Si on réfléchit que les rideaux se font volontiers dans la craie blanche perméable superposée à la craie turonienne marneuse, on reconnaîtra que les conditions de la nature sont reproduites dans l'expérience.

CHAPITRE VI

La dénudation éolienne.

Le progrès des études des géologues conduit à rapprocher de plus en plus l'atmosphère de l'océan, quant aux phénomènes géologiques qui prennent naissance dans son sein. Nous aurons bientôt à voir qu'il s'y fait des sédimentations variées; constatons pour le moment qu'on y observe des phénomènes de dénudation comparables à ceux dont la mer est le théâtre.

La dénudation atmosphérique peut être étudiée sous deux formes principales : le transport de particules incohérentes et la désagrégation de roches plus ou moins dures.

Dans la première série, M. Stanislas Meunier a fait des expériences à l'aide d'une soufflerie agissant sur des sables variés, les uns fins et les autres grossiers, les uns denses et les autres légers, les uns anguleux, les autres arrondis ou en forme de paillettes, etc. Nous reviendrons sur ces essais à propos de la sédimentation; mais il importe de noter tout de suite que le pouvoir de transport du vent à l'égard des particules pierreuses est susceptible de mesures précises. Il y a

d'ailleurs à cet égard un parallèle complet avec le transport analogue réalisé par l'eau courante. L'application la plus directe est dans les triages, dont il serait facile de démontrer les conséquences.

Dans la seconde série, c'est-à-dire relativement au pouvoir de désagrégation du vent, nous aurions bien des expériences à mentionner, les unes accidentelles, et les autres parfaitement raisonnées.

Tout d'abord, on peut reconnaître le mécanisme spécial de cette dénudation dans les localités, comme les plages de bains, où des vitres de verre sont soumises à l'action du vent. On voit tout de suite que l'usure du verre est l'effet des grains sableux charriés par l'air en mouvement. Il suffit parfois de quelques heures pour qu'une semblable vitre soit complètement dépolie par les rayures parfois profondes qui la recouvrent. Et cette expérience involontaire a jeté le plus grand jour sur une foule de faits d'observations tels que, sans parler du polissage des *galets à facettes*, des alluvions du Rhône [1], le vernissage de certaines pierrailles, comme des blocs de grès des environs de Paris (Villeneuve-Saint-Georges, Poligny près Nemours, etc.), ou de dolérite comme celle d'Aréquipa [2], etc.

On sait d'ailleurs que l'usure des corps durs sous le choc du sable entraîné par le vent, a été transformée en un procédé industriel de gravure du verre dont les produits sont remarquables. Sous l'influence de ce

1. Stanislas Meunier, *Le Naturaliste*, t. III de la 2e série, p. 165, 15 juillet 1889.
2. Stanislas Meunier, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 14 octobre 1872.

mode spécial de dénudation, bien des roches subissent dans la nature une véritable dissection : ainsi les surfaces de granit porphyroïde de Ploumanach près de Perros-Guerec, dans les Côtes-du-Nord, montrent leurs quartz en saillie jusqu'à ce que la dénudation les détache de leurs alvéoles. On trouve des roches travaillées par le vent au Colorado, d'après Blake, dans le Centre africain d'après Schweinfurth, dans la Suisse saxonne, au nord de la Bohême et bien ailleurs.

Dans un travail spécial, M. Thoulet a soumis l'*abrasion* [1] à une étude systématique très complète. A l'aide d'un ingénieux appareil qui, grâce à la générosité de son inventeur, fait maintenant partie de la collection de Géologie expérimentale du Muséum d'histoire, il a étudié successivement l'influence sur le résultat de la quantité de sable projeté; de la distance de la roche à l'ouverture du tube d'arrivée du jet de sable; de la dimension des grains de sable projetés; de la nature des grains de sable; de la pression du vent; de l'inclinaison de la plaque de roche par rapport à la direction du jet de sable; de la nature de la plaque abaissée; enfin de l'humidité de la plaque abrasée.

La conclusion, c'est qu'une roche éprouve une abrasion plus considérable quand elle est dépolie que quand elle est polie; que la dimension des grains de sable est presque sans influence sur l'intensité du phénomène; enfin que l'abrasion est proportionnelle à la pression du vent.

1. C'est sous ce nom que les Anglais désignent la dénudation éolienne; on sait que M. de Richthofen l'avait proposé, mais sans succès, pour désigner le travail de dégradation des vagues.

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATION DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE A L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE LA SÉDIMENTATION

Les circonstances dont s'accompagne, en des milieux variés, le dépôt des substances constitutives des terrains sédimentaires, et celles dont s'entourent les modifications ultérieures des éléments déposés, peuvent être vivement éclairées par la méthode expérimentale. Bien que le sujet soit loin d'être dès maintenant épuisé, il offre déjà une masse considérable de données acquises. Il y aura de l'intérêt à les voir réunies.

Ces résultats concernent, les uns l'acquisition par les dépôts, de la forme même qui leur a valu la dénomination de strates, — d'autres les particularités de leur structure très variable, comme on le sait, d'un cas à l'autre; — les derniers, les détails de leur composition.

On trouvera d'ailleurs indiqué de suivre, à propos

de la sédimentation, l'ordre même que nous avons adopté pour l'étude des phénomènes de la dénudation.

Nous examinerons donc successivement :

1° La sédimentation pluviaire, c'est-à-dire par les eaux sauvages;

2° La sédimentation fluviaire, c'est-à-dire par les eaux courantes;

3° La sédimentation marine ou lacustre, c'est-à-dire par les eaux contenues en grande masse dans les bassins;

4° La sédimentation glaciaire;

5° La sédimentation souterraine;

6° Enfin la sédimentation éolienne.

CHAPITRE PREMIER

La sédimentation pluviaire et par les eaux sauvages.

Nous distinguerons ici une sédimentation pluviaire exclusivement mécanique et une autre à la fois mécanique et chimique.

La sédimentation purement mécanique.

Sous l'influence de la chute de la pluie et du ruissellement des eaux sauvages, des matériaux très variés vont s'accumuler en des points spéciaux et y constituent des roches nouvelles dont le mode de sédimentation mérite d'être mentionné.

Leur forme la plus fréquente est celle d'éboulis et leur masse est si formidable, dans tous les pays de montagnes, que leur étude ne peut manquer d'être fort intéressante. Elle n'est guère accessible à l'expérimentation qu'en ce qui concerne la forme des amas de débris.

MM. de la Noë et de Margerie ont examiné le profil des tas de substances non cohérentes telles que le

sable tamisé, le petit plomb de chasse, les graines de millet, et ils ont constaté une constance remarquable dans les pentes d'écroulement.

Il est vrai que les matières examinées sont très homogènes, tandis que les éboulis naturels sont d'ordinaire très complexes ; mais l'expérience montre que le résultat n'est pas influencé par cette circonstance. Les mêmes lois persistent avec des matériaux très différents et avec des dimensions très diverses : les tas de cailloux propres au macadam, les tas de graviers de démolition, voire les tas de pavés, ont les mêmes allures que les tas de sable fin.

Dans tous les cas, les talus sont conformes entre eux et se disposent suivant des lois strictes.

On est très frappé de la régularité des couches inclinées qui composent le sol artificiel dans les décharges publiques, quand pour une raison quelconque on est amené à y pratiquer une section ; et on a de la peine à se rappeler que chacune d'elles provient du brusque épanchement des matières contenues pêle-mêle dans un tombereau.

Dans les expériences réalisées avec des matières hétérogènes, on constate que la sédimentation pluviaire sur les pentes, s'accompagne souvent d'un triage plus ou moins parfait qui a d'ailleurs des caractères variables suivant les cas.

Si la pente est faible, on a un lavage par les eaux des gros matériaux qui restent par conséquent vers le haut de la pente.

Quand la pente est forte, comme dans les décharges

ou dans les talus en équilibre, les gros matériaux roulent en bas.

Lors des modifications de profil du sol par érosion pluviaire, il y a nécessairement passage de l'une de ces formes à l'autre; et de là résulte l'explication de plus d'un mélange de matériaux qu'on a souvent mal interprété.

Mais la forme la plus remarquable de ces terrains pluviaires, parmi lesquels plusieurs types ont été mentionnés, concerne certainement les *épanchements boueux*.

Il importait de voir non seulement en quoi ils consistent, mais comment ils se produisent, et M. Stanislas Meunier a disposé des expériences qui lui ont permis d'en réaliser des imitations complètes.

La catastrophe encore récente de Saint-Gervais (Haute-Savoie) a rappelé l'attention sur des productions de ce genre, mais s'il est rare heureusement que les conséquences des torrents de boue soient aussi désastreuses que le 12 juillet 1892, il ne faut pas oublier que le phénomène est tout à fait normal et constitue comme un trait de la physiologie des régions où il se produit. M. de Montzey[1] en a résumé l'économie dans un travail d'un haut intérêt.

Il suffit d'une excursion de quelques heures dans certaines vallées des chaînes montagneuses et spécialement dans celles des Alpes, pour constater, sur des points déterminés et avec des intensités très variables, le phénomène qui nous occupe. C'est ainsi que la

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences.* t. CXV, p. 305, 8 août 1892.

nappe boueuse du 12 juillet 1892 ne s'est pas étendue dans la vallée de l'Arve sur un terrain ayant la pente générale de cette vallée, mais sur une protubérance deltoïde constituée successivement par des épanchements antérieurs et qu'elle est venue augmenter.

Une fois prévenu, on retrouve de ces deltas boueux, absolument différents des cônes de déjection proprement dits, dans un très grand nombre de localités.

On peut même s'étonner que les montagnards, malgré la notion très nette et très juste qu'ils ont du phénomène, persistent à s'établir dans des points qui sont fatalement voués à des retours successifs de la boue.

Comme exemple, M. Stanislas Meunier cite, parce qu'il l'a étudiée spécialement, une région de la vallée de l'Ill, dans le Vorarlberg, située un peu au-dessus de Schruns et qui, en petit, mais dans des conditions extrêmement favorables, lui a fourni une reproduction exacte du phénomène de Saint-Gervais.

Dans le point dont il s'agit, à Gamprecht, sur le flanc sud-ouest du Hoch-Joch, un petit ruisseau descend sans méandres très sensibles, et suivant la ligne de plus grande pente, dans une rainure qu'il a creusée et qui n'a pas plus de 3 mètres de largeur au fond. La pente est de 60 degrés en moyenne et l'eau qui y circule très rapidement n'y existe que d'une manière intermittente. Après les pluies, c'est une espèce de gouttière d'asséchement des prairies supérieures. A certains moments l'eau est remplacée par la boue qui, au pied de la grande pente, rencontre un terrain incliné à 30 degrés. Alors, la boue ainsi vomie s'étale

en un delta très surbaissé dont le sol remarquablement fertile est cultivé par des maraîchers.

Lors du passage de l'auteur, une coulée de boue venait de recouvrir toutes les cultures de 60 centimètres d'épaisseur. La boue avait contourné les maisons d'habitation de façon à en condamner les portes d'entrée qu'il fallut dégager par un travail de terrassement.

L'étude du delta de Gamprecht a inspiré l'idée d'expériences qui, poursuivies au laboratoire de Géologie du Muséum durant plus de deux ans, paraissent de nature à donner aux épanchements boueux une signification géologique particulière. Nous en donnerons un bref résumé.

Il y a lieu de distinguer dans le cours d'un torrent boueux deux régions différentes : 1° une zone supérieure à forte pente, où la boue se constitue et où elle acquiert une force vive considérable, 2° une partie inférieure à pente beaucoup plus douce, où la boue s'arrête sous la forme d'un delta boueux. Cette seconde région est spécialement intéressante à notre point de vue actuel.

L'appareil dont M. Stanislas Meunier s'est servi d'abord consiste en une table de 66 centimètres de large et de 4 mètres de longueur dont l'inclinaison, variable à volonté, est indiquée par un éclimètre. A la partie supérieure est articulée, par une charnière, une caisse carrée de 18 centimètres de côté et qu'on peut faire basculer à l'aide d'une corde passant sur une poulie, de façon à en déverser, sur la table, le contenu consistant en 35 kilogrammes de boue.

Une modification a consisté à surmonter la table P d'une glissière G de 2 mètres de long (fig. 19), beaucoup plus inclinée et à la partie supérieure de laquelle est une boîte à poste fixe R, renfermant la boue et dont le fond peut s'ouvrir brusquement. La boue qui descend d'abord le long de la glissière vient comme précédemment s'étaler sur la table.



Fig. 19. — Imitation expérimentale des épanchements boueux.

La boue dont on s'est servi a été obtenue en mélangeant avec de l'eau une variété ocreuse de sable de Fontainebleau connue dans Paris sous le nom de *sablon*. Avec 300 centimètres cubes d'eau par kilogramme de sable sec on obtient une boue bien coulante, qui cependant porte sans les engloutir des fragments de calcaire et de granit.

La table étant inclinée à 26 degrés sur l'horizon, on constate que la boue s'y étale de façon à constituer une vraie coulée D, dont la forme est tout à fait comparable à celle des nappes de laves vomies par les vol-

cans. Pendant le déversement, celle-ci s'épanche d'abord latéralement à droite et à gauche, de façon à occuper environ 40 centimètres en largeur. Elle progresse en même temps dans le sens de la pente en une traînée limitée en avant par un bourrelet semi-circulaire et s'arrête après avoir recouvert $1^m,50$ à $1^m,80$ de longueur. Cette traînée reste toujours adhérente à la boue appliquée contre la paroi du réservoir, ce qui montre que sa progression est due avant tout à la pression des parties supérieures.

Le mécanisme de l'écoulement mérite d'être précisé. Dans une coupe verticale passant par l'axe de symétrie de l'écoulement on trouve que la vitesse maxima est à la surface. Mais il existe à l'avant une zone frontale où, à cause de la forme du bourrelet-limite, les parties superficielles descendent vers le sol et viennent se jeter à la traverse des courants horizontaux plus profonds. Il en résulte que le bourrelet est aplati et comme écrasé par le torrent qui s'avance sur lui.

La matière de fond, celle qui est en contact avec le sol, augmentée à la tête de la coulée par les éléments venant de la surface, ne glisse pas du tout. Elle se constitue en une sorte de matelas, bien plus étalé vers l'amont que le torrent lui-même et reste sous la forme de larges *plèvres* à droite et à gauche du flot qui descend. La boue glisse donc sur de la boue qui, dès le commencement de l'écoulement, a comblé les inégalités du sol. C'est ce que montre bien la coupe transversale du torrent (Voy. fig. 21), où les bourrelets 1, 2

et 6, 7 constituent les plèvres entre lesquelles coule tout le torrent.

Ainsi la boue qui coule et sur laquelle pourrait être superposée une masse quelconque de roche, ne tend pas à raviner le sous-sol.

Au contraire, elle en comble les dépressions et y constitue un couloir.

L'influence de la charge supérieure et de la pente sur l'écoulement et sur la forme du delta épanché a été déterminée pour diverses compacités de pâtes. La vitesse d'écoulement a, dans tous les cas, une influence directe sur la largeur des plèvres.

En plaçant des obstacles devant la matière coulante on a produit des intumescences, des divisions du courant en plusieurs bras (fig. 20) et des confluences de plusieurs courants en un seul (fig. 21). L'auteur a relevé une série de diagrammes en plans et en coupes, de ces différentes conditions, dont les figures reproduites ici ne sont que des échantillons.

C'est d'une manière spéciale qu'a été étudiée la puissance de transport des épanchements boueux. Des blocs de roches variées ont été charriés sans aucun frottement sur plus de 1 mètre de longueur (Voy. la fig. 19). Certains d'entre eux ont été rejetés soit sur le front, soit sur les bords de la coulée, de façon à imiter la disposition des moraines glaciaires.

Quand un bloc, préalablement placé en avant du réservoir, reçoit le choc du courant il est ordinairement roulé et recouvert de boue. Cependant, nombre de dispositions permettent à celle-ci de le prendre

par-dessous et de le soulever pour l'emporter à la faveur d'une espèce de jaillissement hydrostatique. C'est la répétition d'un fait que j'ai vu à Saint-Gervais où des meules de moulin ont été prises dans un cellier par le tor-

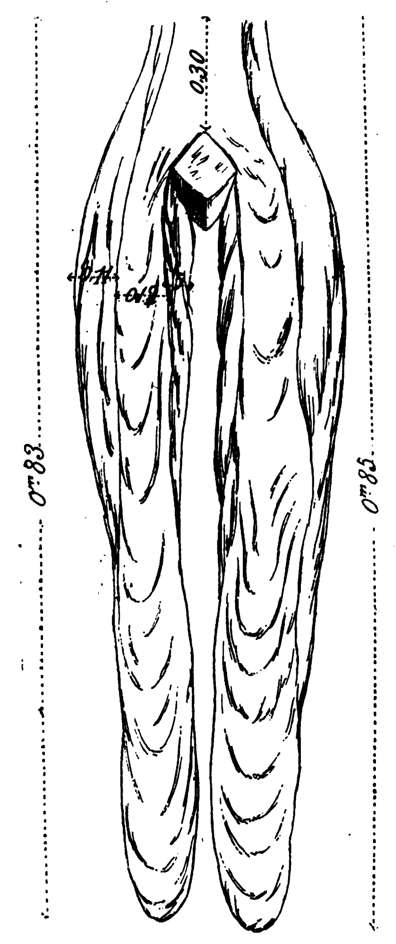


Fig. 20. — Division d'un écoulement boueux en deux bras par la rencontre d'un obstacle.

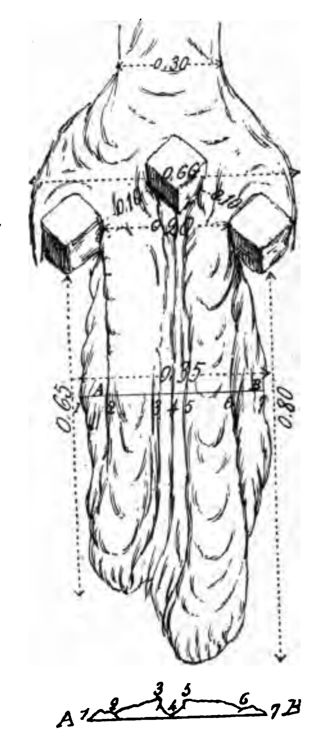


Fig. 21. — Confluence de deux courants boueux en un seul. AB, coupe transversale montrant les plèvres et le sillon médian.

rent et emportées à plusieurs centaines de mètres.

Parmi les conclusions de ces recherches on signa-

lera spécialement celles qui paraissent avoir des applications géologiques directes.

De ce nombre est le transport de blocs rocheux à des distances souvent très grandes et dans des conditions qui feraient supposer l'intervention glaciaire. Il suffit que la pluie fasse disparaître plus tard la boue, pour que les roches charriées se présentent avec l'allure des blocs erratiques proprement dits. La boue entraîne d'ailleurs des pierres non seulement à sa surface, mais sur toute son épaisseur.

Une autre application des expériences, plus fréquente encore, concerne les accumulations de boue à galets dont tant de vallées sont encombrées et qu'on regarde aussi, sans exception, comme du terrain franchement glaciaire. Une partie de ce terrain dans lequel se constituent si facilement, comme nous y avons insisté, les pilastres du genre des *cheminées des fées* de Saint-Gervais, doit certainement son origine au phénomène boueux, et la considération de celui-ci devra provoquer dans certains cas, une restriction dans la dimension généralement accordée aux anciens glaciers.

La sédimentation à la fois mécanique et chimique.

Il est impossible de ne pas faire remarquer que la sédimentation pluviaire peut résulter de la collaboration apportée par des phénomènes chimiques aux phénomènes mécaniques exclusivement considérés jusqu'ici, et c'est ce que nous avons déjà vu à propos de la dénudation. Quand de la craie, par exemple,

est soumise à l'action de la pluie et des eaux sauvages, non seulement elle est désagrégée, mais elle est en partie dissoute et le résidu de cette action chimique se dépose parfois tout de suite avec des caractères spéciaux.

Ceci posé, il était très indiqué de bien préciser la nature des substances résiduelles ainsi produites par les principales roches, afin de déterminer la part qu'elles ont pu prendre à des sédimentations diverses. Les expériences faites dans cette voie ne nous apprennent pas seulement l'origine déjà constatée de l'argile à silex, de certains lits superficiels de sables ou de rognons de compositions variées; elles nous donnent la clé de maintes formations pouvant avoir une importance géologique.

Du nombre paraît être l'argile plastique des environs de Paris, qui consiste en une substance dont l'origine a tant exercé la sagacité des géologues. En face des suppositions qui la font venir de falaises granitiques situées plus ou moins loin, ou de sources du genre des salzes venant de plus ou moins bas, n'est-il pas intéressant de constater qu'elle coïncide par ses propriétés les plus essentielles avec le résidu d'attaque de la craie blanche par les réactifs acides?

M. Stanislas Meunier a fait dans cette direction des expériences qui ne lui laissent aucun doute. Il a attaqué la craie blanche de Meudon par de l'acide chlorhydrique très étendu d'eau, et il a préparé ainsi une argile d'un gris intense, très plastique, donnant à l'analyse la composition exacte de l'argile de Vaugirard

choisie dans ses parties les plus homogènes et les plus foncées.

Cette ressemblance, si intime et si imprévue à cause de la couleur blanche de la craie, poursuivie jusque dans la teneur en substance organique, est de nature à faire rattacher l'argile plastique de Vaugirard à un simple remaniement, par les eaux sauvages, et peut-être par des eaux courantes, du produit d'attaque chimique de la craie par les eaux météoriques, au lieu d'y voir, comme on pourrait en être tenté, des résidus du lavage purement mécanique de la même roche, accompagnée ou suivie des triages, même les plus délicats.

L'auteur, en effet, a recherché par l'expérience ce que donne le lavage de la craie, et quoique opérant sur la même quantité et sur la même qualité de craie, il n'en a jamais retiré ainsi la même substance. Les lavages arrivent à séparer une argile blanche, toujours très calcaire, qui contraste par conséquent avec l'argile plastique, autant par sa couleur et ses caractères physiques que par sa composition. Sans doute le fait s'explique par l'état de combinaison où se trouve, dans la craie, la matière organique avec le carbonate de chaux : un acide seul est capable de la libérer pour lui permettre de s'associer au résidu argileux, qui en est alors coloré.

Un autre fait à rapprocher du précédent, c'est l'isolement, par voie chimique et mécanique, de diverses roches dépendant du terrain danien et représentées, par exemple, au mont Aimé, dans la Marne, par un

sable quartzeux, tout à fait remarquable à cause de l'identité de ses caractères avec ceux du sable dit de Rilly, sur l'origine duquel Hébert avait fait de si singulières hypothèses. Il y a longtemps que M. Stanislas Meunier a appelé l'attention sur ce fait [1].

C'est encore à la sédimentation pluviaire que se rattache pour une large part le dépôt de la terre arable, et l'expérience a été faite mainte fois, qui montre comment une roche attaquée par la pluie se recouvre d'un lit de résidus qui peut contraster avec elle de la façon la plus complète. Dans cette direction, une mention est bien due aux argiles rouges, qui, dans tant de pays, recouvrent les assises calcaires et, par exemple, dans le Gard et dans une grande partie de la Provence. Des expériences directes ont prouvé que ces argiles sont le produit de la décalcification et de la rubéfaction de ces roches, et que l'agent de séparation a été un mélange d'eau de pluie, carboniquée et aérée, et de sulfate de fer provenant de l'oxydation de la pyrite.

1. *Excursions géologiques à travers la France*, p. 199 et 200 (1882).

CHAPITRE II

La sédimentation fluviaire.

Les expériences relatives à la sédimentation fluviaire se lient de la façon la plus intime à celles qui concernent la dénudation par les cours d'eau et dont nous avons antérieurement parlé. Elles ont, en plusieurs circonstances, procuré des notions très précises. Par exemple, sur la plage de Saint-Lunaire, M. Stanislas Meunier a pu suivre, dans le détail, la production des bancs de sable dans des ruisselets artificiellement modifiés et les dépôts des confluents, qui ont avec les deltas des analogies et des différences sur lesquelles on n'a pas assez insisté.

L'extension du diluvium sur une surface très large par un filet d'eau dessinant des méandres a été imitée par le même expérimentateur à l'aide de différents dispositifs. L'expérience de la corde (v. plus haut, page 78) citée à propos de la dénudation doit être rappelée ici.

Belgrand a prétendu faire, de la sédimentation fluviaire, une reproduction artificielle dans les égouts où il lançait de l'eau de chasse, et il se fondait sur la

distribution des matériaux de diverses grosseurs déposés pendant l'assèchement en des points déterminés par la vitesse relative du courant. Les limons fins restent sur les bords à une altitude relativement grande, les gros galets se concentrent dans le thalweg et les graviers occupent des situations intermédiaires. Mais, il serait facile de montrer que cette conformité de distribution est indépendante de la diversité des causes, et ce qui a été dit pour le mécanisme du creusement des vallées nous dispense d'y revenir.

Il faut rappeler seulement que, dans les expériences de M. Stanislas Meunier, les mêmes triages se sont réalisés sans l'intervention des grandes vitesses invoquées par l'ancien directeur des égouts de Paris. Le passage d'un cours d'eau sur le sol détermine le lavage des matériaux déposés et, peu à peu, concentre les graviers les plus gros dans les parties les plus basses. En même temps le ruissellement des eaux sauvages a, comme nous l'avons vu, une influence considérable sur la répartition des différentes natures de particules, et la combinaison de ces effets rend compte de toutes les particularités observées.

Nous nous bornerons, pour éviter les répétitions, à rappeler ce qui a été dit à propos de la dénudation en ce qui concerne l'origine des *terrasses* dont tant de cours d'eau sont accompagnés. L'expérience montre qu'il n'y a pas lieu pour en rendre compte d'invoquer d'autres actions que celles qui fonctionnent actuellement sous nos yeux.

Un des points les plus nets a trait à la liaison

intime de la vitesse d'un cours d'eau avec la dimension des particules transportées et l'application qu'on en peut faire à l'accumulation, en des localités distinctes, de matériaux d'abord mélangés et qui peuvent constituer des masses parfaitement homogènes.

Les inondations des rivières nous mettent à même de bien observer une partie de ces phénomènes, que l'étude systématique complète très heureusement. Une application qui peut être considérée comme consistant en véritables expériences est bien connue de tout le monde sous le nom de colmatage. Hervé Mangon [1] a longuement étudié les inondations volontairement provoquées comme procédé de fertilisation des campagnes, et c'est vraiment une expérience de Géologie que voulait faire M. Duponchel, ingénieur des ponts et chaussées [2], quand il proposait de fabriquer de toutes pièces des terres végétales, produites et amenées au lieu d'emploi par l'effet mécanique des eaux courantes, à l'imitation des alluvions naturelles.

Désagrégés autant que possible par l'action de puissants jets d'eau, les éléments minéraux nécessaires seraient reçus dans le lit muraillé d'un torrent artificiel à grande pente et à section régulière. L'auteur proposait comme emplacement particulièrement favorable à une première expérience, la région des landes de Gascogne, embrassant une surface de 1 200 000 hectares de terrains sablonneux à peu près improductifs. Une rigole de 3 à 4 mètres de largeur sur 2 de pro-

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LVII, 904, 1863.
2. *Ibid.*, t. LVIII, 582, 1864.

fondeur, partant du plateau de Lannemezan et alimentée par une dérivation déjà existante de la Neste, lui paraissait pouvoir fournir par an 20 millions de mètres cubes de limon suffisants pour recouvrir 20 000 hectares sur 10 centimètres. D'après l'auteur, « les frais de premier établissement s'élèveraient à 11 millions; la dépense annuelle, intérêt de ce capital compris, à 1 100 000. En moins de soixante ans, par ce procédé, la surface des Landes serait entièrement régénérée, de manière à faire de ce pays aujourd'hui déshérité, la plus riche province de France. »

Pourquoi cette idée ne serait-elle pas reprise un jour?

M. Fayol a fait, sur les dépôts des corps en eau courante, une série d'expériences [1] qui montrent que le dépôt de chaque particule est déterminé par le résultat d'une espèce de conflit entre la pesanteur qui tend à déterminer une chute verticale et la force du courant qui tend à produire un déplacement horizontal. On opère en abandonnant, librement et sans vitesse, à la surface d'un cours d'eau à régime constant, des grains bien définis qu'on recueille dans un casier disposé à 1 mètre de profondeur.

Quant aux résultats, on trouve que les matériaux lourds, en grains grossiers, ne s'éloignent pas beaucoup de la verticale.

Cependant les grains sphériques de houille, de 600 centimètres cubes, suivent, dans un courant faisant

1. *Études sur le terrain houiller de Commentry*, I[er] volume, Stratigraphie.

0 m. 50 par seconde, une trajectoire inclinée à 45° sur la verticale.

Pour les poussières cette ligne de chute se relève encore et se rapproche de la direction horizontale.

Des végétaux jetés dans l'eau courante, peuvent franchir de très grandes distances sans subir de détérioration sensible, et ce résultat peut être appliqué à l'explication de l'état remarquable de conservation de débris végétaux du terrain houiller.

C'est ainsi que des pétales de rose, de pensée, des feuilles de lierre, de bouleau, de poirier, etc., ont fait 3 kilomètres, sur une eau coulant à raison de 50 ou 60 centimètres à l'heure, sans subir la moindre détérioration.

Les faits dont M. Fayol s'est occupé s'appliquent directement à la genèse des bancs de sable et à la disposition relative des alluvions fines et des alluvions grossières dans les cours d'eau.

L'existence des méandres des rivières, qui répartissent les vitesses dans le courant, de part et d'autre d'une ligne qui n'est point celle qui divise en deux parties égales la surface de la rivière et le déplacement successif de ces méandres, expliquent jusque dans les détails les plus intimes la stratification spéciale des dépôts fluviaires.

Si l'on considère un point spécial du fond d'une vallée et si on éclaire son histoire à l'aide des expériences qui ont été résumées à propos de la dénudation, on constate que sa condition change singulièrement au cours du temps. Il a été d'abord, par exemple, un point de la rive concave où la dénudation

s'exerçait active et il était soumis à un lavage qui en arrachait toutes les substances fines et légères, pour n'y laisser que les gros galets et les autres masses lourdes qui s'y pouvaient trouver. Mais peu à peu, en conséquence de l'écoulement des méandres décrit plus haut, la vitesse de l'eau s'y faisait moins grande et des graviers pouvaient s'y déposer. Ils y étaient, d'ailleurs, dans une situation quelque peu instable et à chaque instant des remous et des filets plus rapides les déplaçaient un peu; ils se comportaient alors exactement comme les sables poussés par les vents dans les dunes et se rassemblaient en bourrelets à structure inclinée dans le sens même du courant. Celui-ci ne tardait pas à dévier, et alors les éléments obliques nouveaux se déplaçaient par rapport aux anciens, de façon à former peu à peu ces lits entre-croisés et enchevêtrés qu'on connaît dans toutes les grevières. Les dépôts se faisaient de plus en plus fins, à mesure que les conditions se réalisaient de plus en plus, de la rive convexe à l'eau presque dormante, et le fond s'exhaussait de couches fines, de moins en moins inclinées, admettant dans leur masse des débris organiques animaux ou végétaux destinés à devenir des fossiles. Mais un nouveau méandre descendait; l'eau redevenait progressivement énergique; une partie du dépôt était emportée, mais une autre était recouverte de matériaux relativement grossiers, qui la fixaient, et la même série des phénomènes recommençait. Rien de plus facile, sur une plage, par exemple, que d'imiter expérimentalement les phases de cette histoire.

CHAPITRE III

La sédimentation marine et lacustre.

La sédimentation en eau calme.

Le dépôt des particules minérales dans une mas aqueuse non animée d'un mouvement général de déplacement horizontal est facilement accessible à la méthode expérimentale.

Le premier fait à considérer concerne les triages réalisés aux dépens d'un mélange tout d'abord aussi hétérogène qu'il conviendrait de l'imaginer. Non seulement par suite de l'agitation déterminée par le vent qui soulève les vagues, il se constitue, parallèlement au rivage, les zones de sédiments connues sous les noms de littorale, pélagique et thalassique, mais on constate que la chute verticale dans l'eau tranquille, détermine des triages très exacts.

Pour mettre ce fait en évidence, M. Stanislas Meunier a recours à un tube de verre de 3 centimètres de diamètre et de 1 mètre de longueur tenu verticalement et fermé à sa partie inférieure. Après l'avoir rempli d'eau, il y jette un mélange très intime de sable quartzeux et de pyrite pulvérisée. On voit se

faire au fond du tube deux couches parfaitement distinctes : la plus profonde formée de pyrite et l'autre de sable quartzeux.

L'exactitude de ces triages est si parfaite que l'auteur a pensé à l'appliquer à l'analyse minéralogique des roches, et c'est dans ce but qu'a été construit l'appareil représenté dans la figure 22. C'est un simple tube de verre T de 4 à 5 millimètres de diamètre et de 5 mètres de long, tenu verticalement et à la partie supérieure duquel est un entonnoir E; vers le bas est un robinet R qu'on peut ouvrir ou fermer à volonté. Après avoir rempli l'appareil d'eau, et le robinet étant fermé, on y jette une poussière de roches[1], d'ailleurs calibrée à l'aide de tamis convenablement rapprochés, et on attend en bas chaque catégorie de minéraux pour la laisser échapper dans un vase V par un mouvement opportun du robinet. Parmi

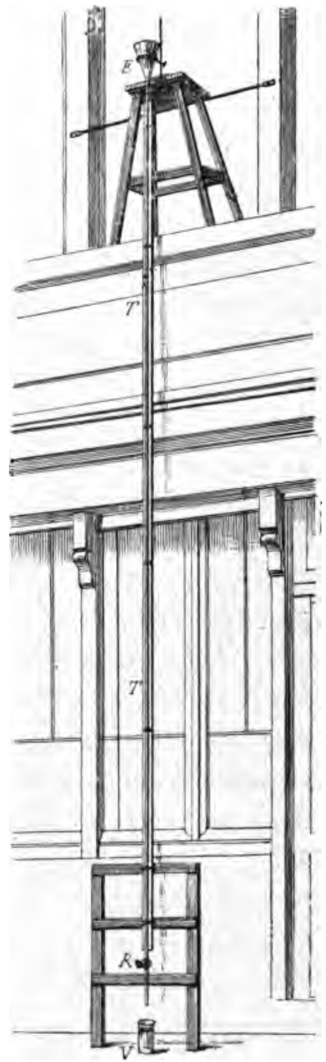


Fig. 22. — Appareil propre à l'étude expérimentale des triages consécutifs à la chute verticale des grains minéraux dans l'eau.

les résultats obtenus on mentionnera seulement ici ceux qui concernent un micaschiste des Alpes et un gneiss grenatifère du Brésil. Pour la première de ces roches, réduite en grains de la grosseur d'une tête d'épingle, tout le quartz arriva sur le robinet et put être recueilli dans un vase spécial, alors que le mica était encore à plus de 1 m. 50 dans le tube au-dessus de l'extrémité inférieure de l'appareil. La séparation peut donc être considérée comme parfaite et convertible en une analyse minéralogique quantitative de la roche étudiée.

Pour le gneiss du Brésil, le résultat fut moins absolu, mais on obtint cependant trois lots bien nettement différents : le grenat arriva de beaucoup le premier; le quartz vint ensuite et la biotite bien plus tard. Dans chaque lot, il y avait cependant des parcelles des minéraux des autres lots, mais seulement des parcelles. Une deuxième opération pour chaque lot donna un triage satisfaisant.

On remarquera que la séparation mutuelle du quartz et du mica se fait très exactement lorsqu'elle n'est pas possible avec l'emploi des liqueurs lourdes. Si en effet les densités sont très sensiblement égales, la résistance opposée par l'eau à la chute des grains de quartz et des paillettes de biotite est extrêmement différente. La méthode, en même temps qu'elle explique des triages naturels, peut donc avoir une application pratique.

Le fait, appliqué à une profondeur suffisante, peut donner lieu à des effets très marqués, surtout si des

courants réguliers horizontaux viennent ajouter leurs effets à la cause précédente.

M. Fayol a étudié de près ce sujet, et on doit rapporter ici quelques-uns de ses résultats, relatifs à la vitesse de chute des diverses catégories de matières. On remarque d'abord que cette vitesse de chute s'accroît d'abord jusqu'à une certaine limite, puis qu'elle reste constante. Pour les corps de très petites dimensions, l'allure uniforme est atteinte presque instantanément, mais pour de gros blocs de 50 centimètres à 1 mètre de diamètre, il faut jusqu'à 3 ou 4 secondes pour que ce résultat soit obtenu.

Pour étudier le phénomène dans l'eau tranquille, l'appareil consiste en un tube de 10 mètres de haut en fer dont la base est en verre. Ce tube étant plein d'eau, on laisse tomber les grains librement sans vitesse et on note le moment de leur arrivée en bas.

L'argile en poussière impalpable (densité 1,70) met 22 heures pour tomber; soit 0 m. 00012 par seconde, $\frac{12}{100}$ de millimètre. La houille (densité 1,30), impalpable, emploie 10 heures, ce qui correspond à $\frac{27}{100}$ de millimètre par seconde. Du gravier granitique en grains, ayant 6 millimètres de côté, accomplit sa chute en 25 secondes, il fait donc $\frac{4}{10}$ de mètre par seconde (40 centimètres). La pyrite en grains, de 4 à 5 millimètres de diamètre, tombe en 19 secondes; elle parcourt par conséquent $\frac{5}{10}$ de mètre à la seconde ou 50 centimètres.

La vitesse de chute augmente ou diminue avec le volume des corps. Elle est proportionnelle à leur densité et inversement proportionnelle à leur surface.

A cette occasion, il est utile de rappeler que quand on subdivise un corps, on augmente sa surface. 1 cube de 1 décimètre réduit en cubes de 1/10 de millimètre prendrait une surface totale 100 000 fois plus grande, et l'on voit que la vitesse de chute d'un même corps peut varier beaucoup avec son état de division.

Ceci étant acquis, un autre point très digne d'attention concerne la forme des sédiments, et les expériences à cet égard pourront élucider bien des problèmes sur l'origine des terrains stratifiés.

Dépôts littoraux. — Dans les régions littorales, il est manifeste que les couches tendent à prendre la forme de talus d'éboulement, forme qui reçoit d'ailleurs, du milieu aqueux où elle se produit, un caractère différent de celui qu'elle présente dans l'air et dont nous nous sommes occupés à propos de la sédimentation pluviaire.

M. Fayol a fait à son égard des expériences dont plusieurs sont fort instructives.

Dans une caisse de 4 mètres de long, 0 m. 30 de largeur, 0 m. 30 de hauteur, préalablement remplie d'eau, on fait tomber des matières terreuses de différentes grosseurs : par exemple, on a formé avec de l'argile une boue liquide qu'on a laissée tomber goutte à goutte au milieu de l'une des extrémités de la caisse. Il se fait une nappe nuageuse qui chemine doucement

et emploie 10 minutes à faire les 4 mètres. La couche formée est de 11 millimètres au point de départ, de 1 millimètre au point d'arrivée, la *pente* est donc de 1/4 de degré; on peut la considérer comme nulle.

Si on donne à la caisse une légère inclinaison vers le point opposé à l'arrivée de la boue, on diminue l'épaisseur du dépôt en amont. Avec pente inverse, c'est-à-dire vers l'amont, on augmente au contraire cette épaisseur.

Avec des grains de sable de 1/10 à 3/10 de millimètre de diamètre, les choses se sont passées de même, sauf que les pentes sont plus accentuées, 1° 1/2 au lieu de 1/4 de degré. La pente varie avec les différentes matières employées.

La propension au triage de matières diverses mélangées se continue d'ailleurs ici et il tend à se produire des lits alternatifs inclinés de 30 à 40° selon les cas. Les corps volumineux comme les coquilles et les galets se disposent parallèlement à cette stratification inclinée.

En employant successivement des grains de différentes grosseurs, on a réalisé des dépôts superposés comme les éléments des talus dont la pente variait en même temps. Le sable, de 2 à 4 millimètres de grosseur de grains, s'établissait avec une pente de 40°; celui de 1 à 2 millimètres avec 36°; de 1/2 millimètre à 1 millimètre la pente était de 34°; de 33° pour 1/10 à 1/4 de millimètre; de 30° pour la poussière très fine; et, en résumé, il est manifeste que les grains les plus fins tendent à l'horizontalité.

En faisant alterner deux dépôts nettement différents,

on a déterminé des apparences de feuilleté surtout bonnes à noter pour ne pas les confondre avec celles qui résultent des actions mécaniques.

Après les alternances des matières diverses, M. Fayol a étudié le mélange de grains différents.

Il a laissé tomber doucement au point de départ d'abord, puis en s'avançant vers le point d'arrivée quand le dépôt a affleuré, un mélange intime de sable composé, en parties égales, de grains de 2 à 4 millimètres et grains de 1/2 à 1 millimètre; en une heure avec 3 litres on a eu un dépôt formé de *lits alternatifs* de grains gros et de grains fins.

Les lits de sable fin, épais en haut, s'atténuaient et disparaissaient en profondeur. Leur inclinaison était d'environ 38 degrés.

Dépôts pélagiques et thalassiques. — Pour ce qui est du dépôt réalisé loin des côtes, on admet volontiers qu'il se fait nécessairement avec une horizontalité, sinon absolue, au moins très approchée. Il importe à cet égard de noter que l'expérience est venue modifier une opinion qui paraissait basée sur l'évidence.

M. de Wegmann[1] a constaté en effet la sédimentation régulière sur un fond incliné.

Il emploie un bassin d'environ 15 mètres cubes, de 2 m. 50 de profondeur, servant à l'arrosement d'un pré et alimenté par un ruisseau d'eau vive qu'on détourne d'abord, et il place au fond une couche épaisse de plâtre, divisée en compartiments mobiles

1. *Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. IV, p. 353.

et préalablement moulée de façon à représenter en petit les inégalités du fond marin. Les pentes atteignent 40°. On ramène le ruisseau dans le bassin et, quand celui-ci est à moitié plein, on y délaye d'abord du sable fin, puis du charbon en poudre, et alternativement l'un, puis l'autre de ces deux corps, leur laissant chaque fois le temps de se déposer.

Après cinq ou six de ces alternances le réservoir est mis à sec et l'on peut s'assurer que les couches successives se sont régulièrement moulées sur le fond onduleux.

Il résulte évidemment de ces expériences, entre autres conséquences, une invitation à la prudence, quant à la supposition de déplacements postérieurs, pour expliquer certains terrains inclinés reposant sur d'autres en stratification discordante.

Dépôts des galets et des coquilles. — Un dernier point à examiner à l'égard de ces phénomènes concerne le mode des dépôts de divers corps caractérisés par leur forme spéciale, tels que des galets et des débris organiques animaux et végétaux.

Pour ce qui est des galets et des coquilles, on fixe volontiers l'attention sur la position d'équilibre qui leur est imposée par leur forme ellipsoïdale et par la tendance que leur grand axe doit manifester de s'établir horizontalement.

Déjà Sténon, il y a plus de deux cent ans, y a insisté en faisant valoir que les trouvailles de galets à grand axe incliné sur l'horizon suffisent pour faire conclure au déplacement depuis son dépôt de la couche qui

les contient. Tout le monde a adopté ce procédé de raisonnement. Mais l'expérience vient nous montrer qu'il n'est pas tout à fait aussi général qu'on l'aurait cru et qu'il faut l'appliquer avec discernement.

M. Fayol en effet a reconnu que les galets plats se déposent parallèlement à des couches préexistantes inclinées, même quand la pente atteint 35 à 40 degrés et davantage.

Dépôts des débris organiques. — Des théories géologiques tout entières, telles que celles qui concernent l'origine des formations houillères, peuvent être modifiées par la notion précise du mode de dépôt de certains débris organiques et spécialement des végétaux entiers ou fractionnés, et M. Fayol a fait à cet égard des recherches spéciales.

Il a jeté des végétaux dans un bassin plein d'eau, de 2 mètres de profondeur. Tous ont fini par s'enfoncer et par se coucher sur le fond du bassin, mais seulement après avoir gardé plus ou moins longtemps l'une des trois positions suivantes : 1° le végétal surnage : il est couché à la surface de l'eau; 2° le végétal est debout, incomplètement immergé : l'une de ses extrémités se montre à la surface de l'eau; 3° le végétal a gagné le fond du bassin, où il reste debout appuyé sur l'une de ses extrémités.

Ce dernier point a une importance toute particulière pour la théorie de la houille.

En effet, on a signalé depuis très longtemps dans une série de gisements où le combustible est exploité, la présence des végétaux arborescents placés debout,

c'est-à-dire perpendiculairement aux strates et donnant l'idée de forêts fossilisées sur place. C'est, par exemple, ce que l'on rencontre à Saint-Étienne, dans le faubourg du Soleil comme dans le faubourg du Treuil, où ces curieux vestiges végétaux sont visibles sur le front de taille de carrières ouvertes dans des grès blanchâtres. C'est ce qu'on a vu aussi à Commentry, et spécialement dans le « banc des roseaux », et c'est ce qu'on a signalé dans bien d'autres loca lités.

Or, tandis qu'on s'est empressé de conclure de cette disposition que la houille résulte d'un phénomène de tourbage, dont l'échelle seulement serait beaucoup plus grande, les expériences qui viennent d'être rappelées permettent de supposer que l'accumulation du combustible dans des points où il est débarrassé de toute autre substance, peut résulter d'un charriage compliqué des triages qui se produisent dans la formation des deltas. Avant d'examiner ce point de vue qui va nous occuper dans un instant, il faut remarquer que la présence des arbres debout semble à première vue lui être tout à fait contraire.

On voit, cependant, dans le Mississipi et dans d'autres fleuves, de grands arbres emportés par le courant dans la position verticale. La terre et les pierres, retenues entre les racines, suffisent à expliquer la tendance de celles-ci à gagner le fond, pendant que la légèreté relative du bouquet de frondaison réalise la condition inverse pour l'extrémité supérieure du végétal. Parfois le poids relatif des diverses

parties de la plante suffit pour produire le même résultat, et c'est ainsi que, dans les expériences, des branches d'arbres se sont comportées de même : une branche de peuplier de 80 centimètres de long et de 5 centimètres de diamètre a surnagé horizontalement pendant soixante-neuf jours ; ensuite elle s'est disposée verticalement en restant à la surface, puis elle s'est enfoncée et est restée quarante-quatre jours debout sur le fond du bassin avant de se coucher.

M. Fayol a reconnu qu'un certain nombre de végétaux et de fragments de végétaux peuvent garder un temps plus ou moins long la position verticale au fond de l'eau.

Toutefois la grande majorité se couche en arrivant au fond du bassin.

Une autre notion très importante, au point de vue où nous sommes actuellement, concerne le temps pendant lequel les végétaux peuvent surnager et qui est très variable. L'auteur a trouvé les nombres suivants.

Tiges de fougère jusqu'à.............	14	jours.
Branches de chêne vertes............	20	—
— — sèches...........	40	—
— acacia vertes...........	45	—
— — sèches...........	128	—
— peuplier vertes.........	69	—
— — sèches.........	337	—
— sureau vertes..........	10	—
— — sèches.........	386	—

Chose remarquable, pour les feuilles c'est l'inverse : les feuilles sèches coulent plus vite que les vertes. Voici quelques chiffres de M. Fayol.

Feuilles de chêne vertes jusqu'à	....	30 jours.
— — sèches	....	12 heures.
— peuplier vertes	....	24 —
— — sèches	....	10 —
— acacia vertes	....	3 jours.
— — sèches	....	2 —
— sureau vertes	....	24 heures.
— — sèches	....	3 —

La sédimentation en eau agitée.

Rôle des vagues. — L'agitation superficielle de l'eau, sous la forme des vagues soulevées par le vent, apporte dans les dépôts une condition spéciale qu'il importe de préciser.

Pour le reconnaître avec certitude il était indispensable de faire intervenir la méthode expérimentale.

M. Fayol a imité le mouvement des vagues à l'aide d'une caisse oscillante contenant de l'eau et où l'on place les poussières minérales dont on veut étudier la sédimentation.

M. Stanislas Meunier a trouvé très préférable de faire agir à la surface de l'eau contenue dans un bassin à fond incliné une roue à palettes (fig. 12), de largeur et de rapidité convenables, dont nous avons donné la description à propos de l'état de la dénudation (v. p. 87).

On reconnaît alors que les vagues ont pour résultat d'étaler les matériaux le long du rivage et d'en faire des couches moins inclinées et plus régulières.

Plus leur action s'exerce longtemps et plus les couches sont minces et étendues.

L'argile et les végétaux tendent à aller au large[1].

Un changement dans l'amplitude des oscillations ou dans la force des vagues produit aussitôt une modification dans la couche en formation.

On est mis à même d'étudier les triages, peu à

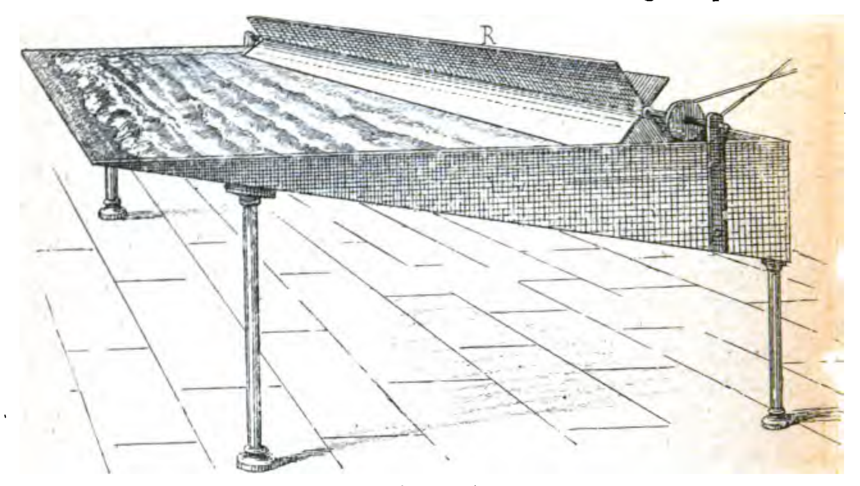


Fig. 23. — Appareil propre à l'étude expérimentale du rôle des vagues.

peu réalisés aux dépens des dépôts complexes, et qui reproduisent des particularités stratigraphiques d'une importance capitale.

Toute l'histoire des cordons littoraux s'y rattache et, pour une part, avec elle, celle des facies auxquels certains observateurs ont voulu faire jouer un si grand rôle en Géologie.

Rôle des courants. — Sur une échelle moindre, les courants agissent parfois comme les vagues. Ils entraînent les particules pierreuses à des distances qui

1. Fayol, *loc. cit.*, p. 510.

dépendent de la grosseur et de la densité de celles-ci. Il est très facile d'en suivre les effets expérimentalement; on constate ainsi qu'ils ne diffèrent pas de ceux qui concernent la sédimentation fluviaire, et dès lors, nous n'avons pas à y revenir.

Tassement des sédiments.

Il y aurait lieu ici de rechercher comment les sédiments naturels qui se sont toujours faits avec une consistance initiale sensiblement nulle, ont pu acquérir la ténacité et la dureté qu'ils présentent quelquefois. Nous savons que d'habitude le fait tient à des phénomènes souterrains très postérieurs au dépôt et avant tout à des cristallisation et à l'introduction de ciments appropriés. Mais il faut reconnaître aussi que le tassement suffit souvent pour communiquer aux dépôts, surtout à ceux qui sont argileux, une grande résistance.

M. Stanislas Meunier a étudié expérimentalement la quantité d'eau immobilisée dans les sédiments de divers genres, et il a dans ce but disposé l'appareil dont la figure 24 indique les différentes parties.

C'est, comme on le voit, un gros tube vertical de 3 à 4 centimètres de diamètre auquel est raccordée par en bas une éprouvette de même largeur et de 1 décimètre environ de longueur. Une échelle graduée règne tout le long de l'appareil; dans le tube est une bouillie obtenue par le délayage dans l'eau d'une substance pulvérulente qu'on se propose d'étudier.

On complète le remplissage avec de l'eau et on laisse en repos. La matière se dépose, et pour que l'expérience soit valable, il faut qu'après son équilibre pris, c'est-à-dire son tassement réalisé, la matière sédimentaire fasse une colonne plus haute que l'éprouvette. On attend qu'il ne se fasse plus de diminution sensible de hauteur dans cette colonne, et c'est une condition qui parfois n'est obtenue qu'après plusieurs jours. On note alors la hauteur du sédiment et en même temps la hauteur de l'eau qui le surmonte. Avec une pince convenablement disposée, on étrangle à ce moment le caoutchouc de raccord entre le tube et l'éprouvette et cette dernière étant séparée, on la pèse immédiatement avec le plus grand soin. Le poids P ainsi obtenu comprend (outre le poids π du verre qui est connu) celui p de la poussière à l'étude et celui p' de l'eau, qui s'est interposée entre ses grains. On laisse sécher et on pèse de nouveau : le poids P′ obtenu cette fois est la somme de π, poids du verre, et de p, poids de la poussière.

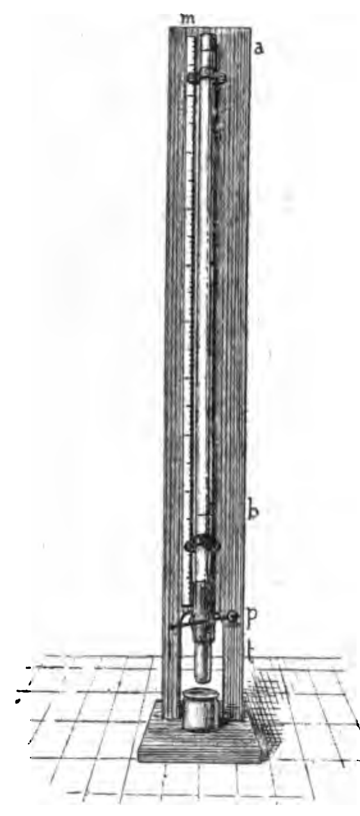


Fig. 24. — Expérience relative à la détermination du coefficient d'humidité des sédiments.

P — P′ donne donc p' ou le poids de l'eau. On mesure directement p en pesant la matière sèche ou en soustrayant π, que donne l'éprouvette après son nettoyage, de P′ et le rapport $\frac{p'}{p}$ est un *coefficient d'humidité*, qui se prête à toutes les comparaisons.

On constate que, toutes choses égales d'ailleurs, il varie :

1° Avec la substance employée;

2° Avec la grosseur des grains pierreux;

3° Avec la pression supportée par le sédiment, c'est-à-dire avec la hauteur de la colonne d'eau superposée. Pour cette dernière étude, M. Stanislas Meunier a disposé au-dessus de l'appareil des raccords permettant d'ajouter par en haut au tube décrit un ou plusieurs mètres de tubes de plus petit diamètre et qu'on remplit d'eau. L'appareil de la figure 22 a rendu des services dans cette voie : le robinet inférieur a été remplacé alors par l'éprouvette de la figure 24, ou plutôt par une éprouvette convenablement modifiée, afin d'éliminer les perturbations dues à l'extension des joints de caoutchouc sous l'influence de la pression.

Sans entrer à cet égard dans des détails que le défaut de place nous interdit, on donnera trois exemples d'expériences choisies parmi un très grand nombre.

Première expérience. — Kaolin lavé en grains tout à fait impalpables, mesurant en moyenne 0 millim. 005. La hauteur du sédiment était de 0 m. 40 et la colonne d'eau avait 1 m. 18 au-dessus de l'éprouvette. Le kaolin tassé dans l'eau pesait 140 gr. 50; après dessiccation, 61 gr. 81.

Le sédiment renfermait donc 78,70 ou 56,02 p. 100 d'eau. Son coefficient d'humidité $\frac{p'}{p} = \frac{78,70}{61,08} = 1,27.$

Deuxième expérience. — Sable de Fontainebleau très fin, grains mesurant 0 millim. 25. La hauteur du sédiment était de 0 m. 40 et la colonne d'eau avait 1 m. 15. Le sable tassé dans l'eau pesait 202 grammes; après dessiccation, 154 grammes. Le sédiment renfermait donc 48 grammes ou 31,10 p. 100 d'eau. Son coefficient d'humidité $\frac{p}{p} = \frac{58}{154} = 0,31.$

Troisième expérience. — Gros sable pyroxénique et pyriteux de Mayotte, grains mesurant 2 millimètres de diamètre. La hauteur du sédiment était de 0 m. 34 et la colonne d'eau avait 1 m. 19. Le sable tassé dans l'eau pesait 419 grammes; après dessiccation, 363. Le sédiment renfermait donc 56 grammes ou 13,38 p. 100 d'eau. Son coefficient d'humidité $\frac{p'}{p} = \frac{56}{336} = 0,15.$

Influence de la pression. — Le sable de la deuxième expérience a été repris et tassé au fond d'un tube d'un mètre de long; sous 85 centimètres d'eau, la hauteur de la colonne sableuse était de 36^{c},7. Sous la colonne de 5 mètres, elle devint 35,6. Le coefficient d'humidité de 0,31 qu'il était d'abord devint 0,40.

La formation des deltas.

Les portions des bassins marins et lacustres, où viennent se déverser des cours d'eau présentent, au point de vue sédimentaire, des conditions spéciales et

qu'il importe d'autant plus de mentionner qu'elles ont été précisées d'une façon remarquable par la méthode expérimentale.

Malgré l'exagération possible des conclusions qu'on en a tirées, il est juste de faire remarquer qu'elles ont conduit à modifier du tout au tout, au profit de la doctrine actualiste, le point de vue naïf et étroit qui faisait autorité pour tout le monde, ayant été formulé par Élie de Beaumont. D'après ce savant, qui d'ailleurs n'était en ceci que l'écho de Dolomieu, l'époque actuelle serait l'*Ère des deltas*, comme elle serait (et tout aussi inexactement) l'ère des dunes et l'ère des volcans à cratères.

Après avoir étudié expérimentalement les deltas, on a reconnu qu'il y a eu des formations analogues dès le début des époques sédimentaires — comme on a reconnu aussi qu'il y a eu des volcans et des dunes de tous les âges. La ligne de démarcation entre le passé et le présent n'a pas tenu debout une minute, devant l'étude impartiale des faits.

Les deltas sont avant tout formés de dépôts fluviatiles, mais leur dépôt est de cause marine ou lacustre, ayant été déterminé par la perte de force vive des cours d'eau pénétrant dans un large bassin, perte à laquelle correspond nécessairement une diminution correspondante des facultés de charriage.

Quoique les ensablements de bien des ports aient pu être regardés comme des expériences accidentelles concernant les formations deltoïdes, les recherches de M. Fayol méritent d'être citées au commencement de ce chapitre de la Géologie synthétique.

Elles concernent : d'une part la forme générale du dépôt et d'autre part sa structure; et elles ont été réalisées soit à l'aide de petits appareils de laboratoire, soit au moyen d'un ruisseau dont les eaux pouvaient être chargées de troubles et d'un bassin de déversement qu'il était loisible d'assécher pour en examiner les dépôts.

Il suffit parfois d'une heure pour amener la constitution de deltas qui, comme le montrent les dessins publiés par l'auteur, présentent avec des formations naturelles les ressemblances de forme les plus intimes. Le delta du Mississipi et en particulier sa portion connue sous le nom de Passe à l'Outre, ont été imités scrupuleusement.

M. Stanislas Meunier a, de son côté, utilisé les dispositions présentées par la plage de Saint-Lunaire, pour provoquer des dépôts tout pareils et dont beaucoup semblaient des réductions de localités naturelles.

Pour ce qui est de la structure des deltas, il y a à distinguer ce qui concerne, d'une part, la forme des couches dont ils sont constitués et, d'autre part, le triage subi par les matériaux qui les composent.

M. Fayol, faisant arriver dans une caisse pleine d'eau un cours d'eau de 10 litres par seconde et charriant des matières jetées à la main à quelques centimètres à l'amont de la chute, reconnut d'abord que la pente de chaque dépôt est liée, pour une même matière, à la grosseur des grains.

Avec du sable ayant successivement un diamètre de 2 à 4 millimètres, puis de 1 à 2, puis de 1/2 à 1, puis

enfin de 1/10 à 1/4 de millimètre, on eut des pentes égales, dans le premier cas à 38 degrés, dans le second à 36, dans le troisième à 34 et dans le quatrième à 31. Des poussières impalpables s'étalèrent sous un angle de 2 degrés. En somme les pentes, toutes choses égales d'ailleurs, tendent à être plus faibles qu'en eau stagnante.

Mais le point le plus fécond en conséquences concerne les triages qui se font dans la masse du delta, quand le cours d'eau générateur est chargé de substances hétérogènes. M. Fayol a montré comment le résultat produit peut simuler, par la superposition de fins feuillets obliques, dans chacun desquels le triage s'est réalisé, une sédimentation horizontale constituée par des couches très nettement distinctes. La Géologie du bassin de Commentry a été élucidée par ces expériences, qui paraissent devoir s'appliquer aussi à l'explication d'autres gisements de houille.

Il importe de souligner, à cette occasion, d'abord l'identité de structure des deltas torrentiels avec les deltas fluviaires et, d'un autre côté, le contraste présenté avec eux par les cônes de déjections.

CHAPITRE IV

La sédimentation glaciaire.

Il ne nous a pas été possible de traiter de la dénudation glaciaire, sans mentionner du même coup les faits les plus essentiels qui concernent la sédimentation réalisée par les glaciers.

Le transport des matériaux rocheux par la glace en mouvement, n'a pas besoin d'être imité par des expériences spéciales, puisqu'on peut en préciser tous les détails par la simple observation. Cependant on doit remarquer que, malgré la différence d'état physique, un glacier se comporte vis-à-vis des pierrailles de sa surface comme un cours d'eau vis-à-vis des corps flottants.

Aussi retrouve-t-on, dans la distribution des bouchons et des autres corps légers sur les berges des rivières, une foule de particularités qui s'appliquent au dépôt des moraines latérales. Il y a là comme une expérience accidentelle qu'il fallait au moins mentionner.

CHAPITRE V

La sédimentation souterraine.

La sédimentation souterraine est un chapitre de la Géologie dont l'importance est des plus considérables et qui, cependant, a été en général complètement méconnu. Je me suis attaché, depuis un grand nombre d'années, à en signaler les différentes formes, et l'on va voir comment l'expérimentation est venue en élucider les principaux problèmes.

On peut le regarder, dans un très grand nombre de cas, comme un contre-coup nécessaire et une contre-partie de la dénudation souterraine, c'est-à-dire comme devant son développement au fait même de l'infiltration des eaux. Deux formes peuvent être distinguées, selon qu'il est question d'une sédimentation mécanique ou d'une sédimentation chimique; et il y a lieu de considérer séparément ce qui se produit dans des cavités préexistantes du sol ou simplement dans les pores des roches. Nous choisirons quelques faits ressortissant à ces diverses catégories.

La sédimentation souterraine mécanique.

M. Stanislas Meunier a décrit une expérience très simple qui montrera d'un seul coup en quoi consiste la sédimentation mécanique souterraine, réalisée dans la masse de roches non crevassées, et comment elle doit s'appliquer aisément à un très grand nombre de phénomènes naturels :

Dans une éprouvette à dessécher (fig. 25), munie d'un tampon d'amiante, on place d'abord une couche *q'* de sable à grain moyen, de 3 centimètres environ d'épaisseur, et par-dessus une couche *m* de 5 centimètres d'une poudre formée de parties égales de craie et de fer oxydulé qu'on recouvre elle-même d'une couche *q* de 10 centimètres de sable quartzeux grossier. On remplit l'éprouvette d'eau légèrement acidulée par l'acide chlorhydrique et on remplace le liquide au fur et à mesure de son écoulement, qui se fait très lentement, par la tubulure inférieure de l'éprouvette.

Il se dégage de très fines bulles d'acide carbonique et l'on ne tarde pas à voir la portion supérieure de la couche de craie, qui était d'un gris assez clair malgré le mélange de la magnétite, devenir tout à fait noire par la constitution d'un lit d'abord très mince *f*, mais qui s'épaissit peu à peu, de fer oxydulé tout à fait pur.

Si on arrête l'expérience à ce moment, on voit que l'éprouvette contient quatre couches au lieu de trois qu'on y avait mises. La couche noire *f*, qui est venue s'ajouter aux autres, dérive de la sédimentation sou-

terraine. Si on continue jusqu'à dissolution complète de la craie, on n'a plus que trois couches, mais la

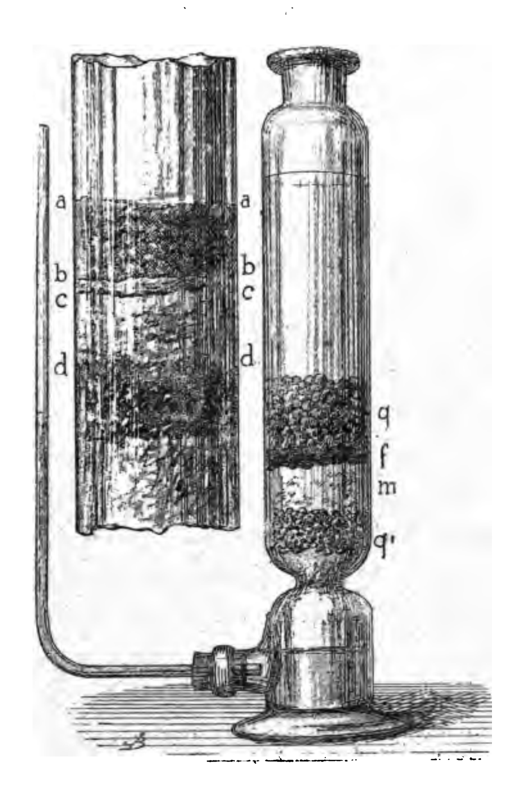


Fig. 25. — Expériences sur la sédimentation souterraine.

couche mince de magnétite noire remplace la couche grise relativement épaisse du début.

Il est facile de montrer que cette expérience reproduit une condition qui s'est réalisée un nombre immense de fois dans l'épaisseur de la croûte terrestre. Des quantités de lits de sable, de gravier, de

rognons peu solubles, d'argile, etc., doivent être rattachés à ce processus de la sédimentation mécanique souterraine, et ces produits ont bien souvent induit en erreur les stratigraphes, préoccupés de retrouver, dans les conditions du milieu originel, les causes de toutes les particularités de chaque couche.

On peut à cet égard mentionner comme exemple la manière dont MM. Gosselet et Barrois comprennent la concentration des nodules phosphatés qui, dans les Ardennes, sont exploités sous le nom de coquins.

« Ces rubans de coquins, disent-ils, sont dus à ce que le sable inférieur a été affouillé; les grains menus ont été enlevés tandis que les parties les plus lourdes sont restées sur place. C'est bien le caractère d'un phénomène littoral. *Comme il était contemporain de la formation des nodules de phosphates, il indique dans quelles conditions ceux-ci ont pris naissance*[1] ». Suivant nous, au contraire, ces nodules se sont concrétionnés tout doucement, dans la masse d'une roche calcaire, longtemps après son dépôt — comme ont fait ailleurs les rognons de silex, — et c'est le phénomène de la dénudation souterraine qui, en enlevant tout le calcaire, a produit leur concentration en niveaux continus.

Les bone-beds de tous les âges sont bien souvent des produits comparables; les sables phosphatés qui couronnent la craie et remplissent ses poches, les

1. Traductions et reproductions publiées par la Société belge de géologie, de paléontologie et d'hydrologie, 1889, p. 16. Cette notice fait partie de son tome III.

argiles dites à silex, les *biefs* de tous genres, le sable blanc de Rilly et bien d'autres roches sont dans le même cas. Sans compter que bien des couches calcaires, comme celles de la craie, ont subi partiellement les phénomènes dont nous nous occupons et qui expliquent par tassement la désorganisation des larges tests d'Inocerames par exemple.

M. Stanislas Meunier, parmi les très nombreuses variantes qu'il a données à son expérience, décrit celle-ci, qui paraît bien probante et dont le résultat est représenté fig. 25 à plus grande échelle que l'appareil complet : Les deux couches *a* et *d* de sables quartzeux, mis dans l'éprouvette de tout à l'heure, sont séparées par un lit *c* de la poussière obtenue en pulvérisant purement et simplement du calcaire de Lorraine. Au bout de quelque temps d'attaque par l'eau acidulée, on voit se constituer sur le calcaire une petite couche *b* extrêmement régulière, mince, mais très visible, à cause de sa couleur, d'une argile rougeâtre, dont l'aspect rappelle exactement une foule de lits argileux de nos terrains calcaires.

On peut varier beaucoup ce mode opératoire et, par exemple, faire alterner plusieurs fois les couches du sable et les couches partiellement solubles, et puis superposer des couches partiellement solubles donnant des résidus variés. On arrive alors à constituer des ensembles qui n'ont aucun rapport apparent avec ceux dont ils dérivent et qui jettent la lumière la plus vive sur maints terrains *épuisés*, comme les biefs de Picardie et le terrain argilo-siliceux de Prépotin

aux environs de Mortagne (Orne), que M. Stanislas Meunier a étudié d'une manière spéciale[1].

Au point de vue de la Géologie générale, il convient ici de faire remarquer tout spécialement que les phénomènes de la *sédimentation continentale* ne sont évidemment pas spéciaux à l'époque actuelle. Chaque fois qu'une portion de territoire a été exondée et que sa surface est restée assez longtemps soumise à l'action des eaux d'infiltration provenant des pluies, les phénomènes de décalcification, d'épuisement en silice, de rubéfaction se sont nécessairement produits. L'affaissement postérieur de la région a souvent permis le retour de la mer et la reprise de la sédimentation marine et, par conséquent, il y a nécessairement beaucoup de régions où des masses, parfaitement réglées et comprises entre des dépôts marins, reconnaissent cette origine continentale. Leur détermination serait d'un très haut intérêt au point de vue de la paléogéographie et, en conséquence, on doit s'attacher à les rechercher avec le plus grand soin.

La sédimentation souterraine chimique.

En ce qui concerne la sédimentation souterraine chimique, il faut remarquer qu'elle résulte de l'infiltration dans le sol d'eaux contenant des principes dissous qui peuvent s'y incorporer. Cette incorporation se fait tantôt à l'état de ciment de dépôts meubles

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CXXVII, p. 1041, séance du 12 décembre 1898.

antérieurs, tantôt comme produit d'une double décomposition, dans laquelle les roches jouent le rôle très actif de précipitants.

Le ciment le plus fréquemment introduit dans le sédiment est le carbonate de chaux; on peut dire que la sédimentation souterraine de cette substance est de tous les instants, et l'on sait qu'elle tient à la décomposition des solutions de bicarbonate de chaux. L'origine des tufs calcaires est éclairée par l'encroûtement des tuyaux de conduite; la formation des stalactites et des stalagmites, dont les cavernes sont parfois obstruées, et à laquelle se rattache la production des veines des marbres, est imitée par les produits qui se développent, sous beaucoup de ponts, par les infiltrations de la pluie dans les matériaux de construction. On a donné une forme industrielle à de vraies expériences d'incrustation dans le bassin des sources de Clermont-Ferrand (Sainte-Allyre), de Carslbad, de Tivoli et d'ailleurs.

La structure spéciale de nombre de travertins peut être imitée expérimentalement. M. Stanislas Meunier a démontré, par exemple, de cette façon que les tubulures si fréquentes dans les dépôts fontigéniques sont dues à des dégagements gazeux. Dans une terrine on place un lit de gravier au milieu duquel on fait arriver la partie inférieure d'un entonnoir. Par-dessus est disposée une couche de calcaire en petits fragments; le tout est recouvert d'une couche d'argile délayée à une consistance demi-liquide, ou une couche de plâtre gâché, convenablement pâteuse.

Dès qu'on verse de l'eau aiguisée d'acide chlorhydrique dans l'entonnoir, on voit les bulles d'acide carbonique se faire jour au travers de la couche plastique superficielle, et y laisser des canalicules qu'on peut conserver par dessiccation et qui offrent toutes les



Fig. 26. — Reproduction artificielle de la structure tubuleuse des travertins.

particularités des tubulures, prises comme exemples, de la craie jaune de Meudon ou des meulières de Carnetin, ou du calcaire d'Étampes, ou de beaucoup d'autres travertins.

L'auteur a donné une autre forme plus simple à l'expérience en faisant simplement bouillir une pâte de plâtre dans un plat de fer; le résultat représenté par la figure 26 a la plus grande ressemblance avec les produits naturels que nous avons en vue.

Une autre série de faits très voisine des précédentes concerne la cimentation des grès, par l'introduction d'un ciment salin et spécialement par le carbonate de

chaux. Dès 1867, M. Stanislas Meunier[1] s'est préoccupé de leur imitation expérimentale. Comme le bicarbonate de chaux n'est pas d'un maniement très facile, il lui a substitué d'autres sels et il a obtenu (fig. 27), en faisant arriver des gouttes de liquide salé dans une couche de sable, des boules libres B, ou groupées A, et des rognons de toutes formes C, D, identiques à ceux qu'on rencontre dans les couches du sol. On active le résultat, sans le modifier, en opérant sur du sable chaud.

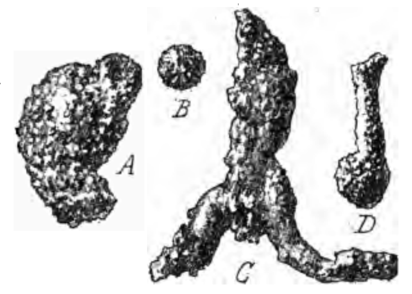


Fig. 27. — Imitation artificielle de la cimentation des sables sous forme de rognons gréseux.

L'auteur a pu d'ailleurs employer le bicarbonate de chaux et obtenir des indurations complètes du sable. Voici comment il a opéré : dans un large vase, fermé à sa partie inférieure par une toile à tamis en crin de grosseur convenable, il a mis un lit de sable pur, analogue à celui qui fait les couches blanches du terrain de Fontainebleau. Sur ce sable, a été déposée une certaine épaisseur de carbonate de chaux précipité et suspendu dans l'eau. Au sein de l'eau on a amené à l'aide d'un fin tube à gaz et d'une façon continue de l'acide carbonique, et la dissolution de bicarbonate ainsi produite a filtré au travers du sable. Vers le bas elle s'est décomposée et il n'a pas

1. *La Presse scientifique des Deux Mondes* (Paris).

tardé à se faire une pellicule d'un vrai grès calcaire tout pareil à celui de la nature.

On obtient un très bon résultat en mélangeant le sable d'une petite proportion de carbonate de chaux précipité : sous l'influence de l'eau qui circule, ce sel cristallise et se constitue très rapidement à l'état de ciment du grès.



Fig. 28. — Imprégnation bitumineuse artificielle du calcaire grossier de Gentilly. Au grossissement de 60 diamètres.

Parmi les variantes nombreuses dont cette expérience est susceptible, on mentionnera ici celle qui concourt à cimenter des sables par du bitume introduit dans des sables calcaires à l'aide d'un dissolvant approprié. Le pétrole convient très bien, et M. Stanislas Meunier, dans des études synthétiques sur des roches asphaltiques du Jura [1], a employé aussi avec grand succès le sulfure de carbone. On peut vérifier au microscope (fig. 28) que l'imprégnation bitumineuse s'est faite exactement, dans le calcaire grossier de Paris, par exemple, comme dans le calcaire néocomien de Lovagny ou du Val de Travers. Cette figure montre, au grossissement de 60 diamètres, comment le bitume s'est insinué en veinules

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CXXII, p. 1337, 1896.

et en amas, dans le calcaire à millioles de Gentilly (Seine).

Parmi les caractères très nets des travertins et des autres dépôts calcaires, siliceux ou ferrugineux, il importe de signaler très spécialement la structure oolithique. On sait que les oolithes consistent en petites sphérules à couches concentriques et à contexture tantôt amorphe (limonite), tantôt cristalline, et alors radiée (calcite).

Il est certain que nombre de ces pisolithes, recueillies dans le bassin de sources carboniquées bouillonnantes, résultent d'une précipitation de calcaire accomplie dans des conditions dynamiques spéciales. L'expérience est venue l'établir d'une façon incontestable et on peut tout d'abord mentionner un résultat accidentel du plus haut intérêt, dont nous devons la connaissance à M. E. Derennes. Afin de débarrasser de son excès de calcaire l'eau d'alimentation des locomotives, la Compagnie du chemin de fer du Nord avait installé à Laon de grands bassins dans lesquels un courant de cette eau venait rencontrer un courant de lait de chaux. La neutralisation, opérée dans les remous, engendrait des milliers d'oolithes tout à fait semblables à celles des sources gazeuses et résultant de conditions un peu différentes. M. Stanislas Meunier en a donné[1] une description microscopique qui montre leur conformité intime avec les pisolithes classiques.

Il a aussi monté un petit appareil qui a procuré des

1. *La Nature*, année 1881 (1er semestre), p. 251.

produits pareils aux précédents et qui consiste en un petit ballon tournant autour de son axe et dans lequel une solution de bicarbonate de chaux est lentement additionnée de lait de chaux. L'auteur a varié ce dispositif en faisant arriver du bicarbonate de chaux dans une eau animée du mouvement de rotation et où des poussières sont tenues en suspension.

Mais l'étude des pisolithes et des oolithes de la nature, en les rattachant à des concrétions de tous les volumes, montre qu'elles n'ont pu se faire toutes, et dans les cas les plus ordinaires, dans les conditions de tourbillonnement dont nous venons de parler, non plus que sur le littoral de la mer, comme on les trouve dans les récifs madréporiques. De proche en proche on arrive à la conviction que les immenses amas d'oolithes, comme celles qui constituent des couches entières dans le terrain jurassique, ne sauraient provenir de ces mécanismes.

L'expérimentation, sans avoir encore donné des produits complets, indique cependant que dans le sein des dépôts hétérogènes, des forces attractives spéciales tendent à isoler des granules de certaine substance au milieu du magma général. C'est ainsi que Seguin aîné, ayant gâché de l'argile dans de l'eau salée, a trouvé, dans la pelote de terre une fois desséchée, des cristaux de chlorure de sodium relativement volumineux. On ne doit pas douter que la plupart des oolithes, dans le terrain sidérolithique comme dans les couches calcaires du terrain jurassique, ne résultent d'attractions analogues.

Ces phénomènes, d'ailleurs bien plus fréquents qu'on ne l'imaginerait tout d'abord, se traduisent souvent par des changements de structure qu'il y avait grand intérêt à étudier par la méthode expérimentale.

Henri Sainte-Claire Deville a vu beaucoup de sels,



Fig. 29. — Cristallisation artificielle du gypse. 1/2 grandeur naturelle.

comme le sulfate de chaux, le carbonate de plomb, le chromate de plomb, précipités à l'état amorphe, devenir peu à peu cristallins, par des alternatives de refroidissement et de réchauffement, et les applications de ces faits sont immédiates, par exemple, à la structure cristalline du test des bélemnites et de bien d'autres coquilles fossiles.

M. Stanislas Meunier, en abandonnant, pendant six ans, un fragment tout à fait cireux de l'albâtre de Thorigny dans l'acide chlorhydrique, l'a converti complètement en un agrégat de longs cristaux remarquables par leur dimension et par la netteté de

leur forme (fig. 29). Les cristaux ainsi obtenus, qui mesurent jusqu'à 7 centimètres de longueur, sont identiques à ceux qu'on recueille dans l'argile plastique avec un allongement et un aplatissement plus marqués. On y voit dominer les faces g^1, m et a^3 avec mâcles suivants, h'.

Nous pouvons aussi rattacher à des phénomènes d'attraction moléculaire la production des *dendrites*, si fréquentes dans les fentes des roches, et c'est l'occasion de mentionner des expériences très nettes de M. Stanislas Meunier sur ce sujet particulier. En gâchant du plâtre à mouler dans une dissolution de permanganate de potasse et en abandonnant ensuite le produit à lui-même pendant plusieurs mois, il a vu le gâteau, d'abord d'un beau rose, brunir, puis se recouvrir d'innombrables petites mouches de bioxyde de manganèse hydraté (acerdèse) parfaitement cristallisé et ayant tous les caractères des dendrites. Le résultat est vraiment remarquable, quoique le procédé ne puisse être considéré comme comparable à celui que la nature a mis en œuvre. Nous reviendrons dans un moment, à propos de l'activité précipitante du calcaire, sur d'autres imitations de dendrites.

Il se trouve en effet que, dans l'ordre d'étude où nous sommes engagés, il y a lieu de faire une très large place, dans la sédimentation souterraine chimique, à l'activité précipitante du calcaire sur des dissolutions métalliques.

Pour comprendre l'intérêt de cette question, il importe de rappeler que des dissolutions métalliques

peuvent en effet s'infiltrer dans un très grand nombre de circonstances dans les profondeurs du sous-sol. Et tout d'abord nous mentionnerons les phénomènes qui prennent naissance dans les chapeaux des filons.

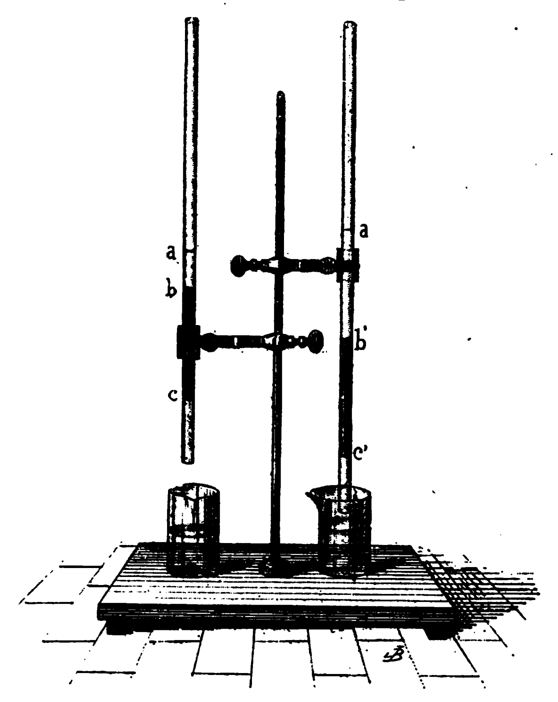


Fig. 30. — Expérience sur les précipitations métalliques réalisées par le calcaire.

Sous l'influence des actions dénudatrices dont nous avons parlé, les sulfures en s'oxydant donnent des sulfates, que les eaux peuvent souvent dissoudre et transporter au contact de roches variées. Or, si ces liquides rencontrent du calcaire, et ils ne peuvent y manquer après un trajet plus ou moins long, ils se transforment en sèls de chaux et abandonnent le

métal qu'ils contenaient dans des points où, progressivement, il peut se concentrer jusqu'à donner lieu à des gîtes plus ou moins exploitables.

Une première expérience exécutée par M. Stanislas Meunier suffira à prouver ce point. Dans un tube vertical ouvert aux deux bouts (fig. 30), mais contenant un bouchon d'amiante, on met une couche *cb* de quelques centimètres de craie pulvérisée, puis on verse par-dessus une dissolution *ba* de sulfate de cuivre. Le liquide qui filtre bientôt, reçu dans un verre, où l'on a mis quelques gouttes de ferrocyanure de potassium, ne donne aucune réaction colorée, d'où il résulte qu'il ne contient plus trace de cuivre : tout ce métal a été immobilisé par le calcaire. On voit des effets pareils au pied des piquets télégraphiques injectés de couperose bleue et qui ont été enfoncés dans les sols crayeux.

L'expérience, répétée avec un grand nombre de métaux, donne des résultats comparables, et dans le nombre il faut citer celles qui concernent les sels de fer, à cause des applications variées qu'on en peut faire à des questions géologiques et agronomiques.

Dans le tube de droite de la figure 30 on a versé, sur de la craie en poudre, un mélange de sulfate de fer et de sulfate de magnésie. Dans le vase inférieur on ne recueille qu'un mélange de sulfate de magnésie et de sulfate de chaux, sans trace de fer.

La pyrite qui entre dans la constitution de tant de sédiments donne, par son oxydation, du sulfate de fer évidemment très abondant dans le sol et dont il est intéressant d'étudier les gisements. A Cransac, à Vau-

girard et bien ailleurs, on recueille du sulfate de fer (apatélite) en efflorescence à la surface du sol; et la méthode expérimentale est tout indiquée pour préciser son histoire ultérieure.

Tout d'abord M. Stanislas Meunier place un fragment de marbre de Carrare dans une solution de sulfate de fer. Au bout de très peu de temps, on voit se déposer sur la roche une matière ocracée, pendant que de l'acide carbonique se dégage. En même temps le liquide renferme du sulfate de chaux facile à faire cristalliser par simple évaporation.

Les applications de ce fait sont extrêmement nombreuses :

Supposons d'abord que la solution ferrugineuse se fasse jour dans un sable quartzeux mélangé d'une petite quantité de particules calcaires. L'effet obtenu sera la constitution d'un grès quartzeux à ciment de limonite. Nous en avons eu au Muséum en 1871 un exemple accidentel que nous avons rappelé (v. p. 50). Et ce fait peut évidemment jeter la lumière sur l'origine de l'*alios* des Landes, dont M. Stanislas Meunier a du reste fait une reproduction synthétique complète.

On sait quels sont les caractères généraux de cette formation si bizarre et dont l'existence introduit dans la région landaise de si regrettables conditions agronomiques et hygiéniques.

Dans un entonnoir (fig. 31) fermé par un bouchon poreux d'amiante un peu tassée, on met une certaine épaisseur de sable mélangé de carbonate de chaux pré-

cipité, puis on recouvre avec du sable pur et on arrose d'une solution étendue de sulfate de fer. Il se fait dans le sable calcarifère un grès ferrugineux qui ne tarde

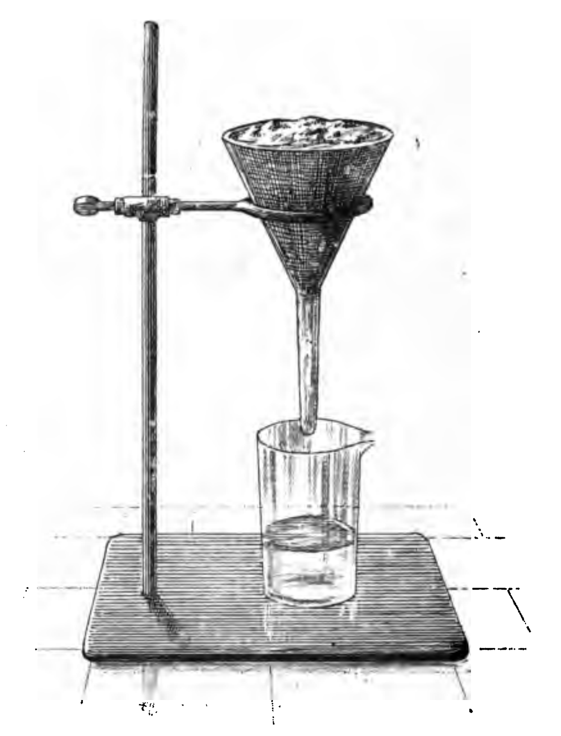


Fig. 31. — Reproduction artificielle de l'alios des Landes.

pas à être absolument imperméable; de telle sorte que sa production met fin à l'expérience.

Comme M. Stanislas Meunier y a insisté, ces études sont susceptibles de conséquences relatives à la fossilisation, et par exemple il a reproduit des circonstances qui éclairent l'histoire de certains grès ferrugineux renfermant des empreintes de coquilles, comme on en

connaît à Romainville (Seine), à la base des sables de Fontainebleau.

Dans l'entonnoir de tout à l'heure, on place un mélange de sable et de calcaire précipité dans lequel on noie un certain nombre de coquilles fossiles, telles que des *Cytheræa* et des *Pectunculus* de Jeurre; cela fait, on arrose avec la solution très étendue de sulfate de fer. Si on arrête l'expérience après un certain temps, on voit les tests devenus d'un bleu de turquoise intense pareil à la nuance de certains nids de l'argile plastique d'Arcueil. Mais, pas plus que dans la localité naturelle, la couleur bleue n'est solide : au bout de quelques heures elle devient ocreuse et révèle ainsi sa cause, qui tient à du protoxyde de fer, tout à fait instable, comme on sait, au contact de l'air. Si au contraire on continue l'expérience, on amène, au bout d'un temps suffisant, la transformation du test en un amas de limonite.

A côté du cas précédent où le calcaire est seulement en grains plus ou moins gros vis-à-vis de la solution métallique, nous pouvons supposer que le sel de fer rencontre le sel de chaux à l'état de dissolution. L'expérience a montré à M. Stanislas Meunier que la précipitation se fait encore dans ce cas, et sous des formes concrétionnées qui peuvent être intéressantes. L'appareil se compose d'un bassin où les deux dissolutions viennent se mélanger. La limonite prend des formes tuberculeuses qui coïncident tout à fait avec celles des grains de minerai de fer des lacs, et l'on ne peut douter que l'expérience ne s'ap-

plique directement à l'histoire de cette curieuse substance.

Enfin, nous aurons avec profit à considérer le cas où la solution ferrugineuse vient s'attaquer à du calcaire massif. Certainement nous sommes ici en présence du phénomène qui a donné naissance aux amas dits sidérolithiques.

M. Stanislas Meunier fait arriver un filet d'eau contenant du sulfate de fer à la surface supérieure d'une dalle de calcaire recouverte d'une épaisse couche de sable quartzeux : les effets de dénudation observés précédemment avec l'eau chargée d'acide chlorhydrique se renouvellent et une *poche* se creuse peu à peu; mais des résultats sédimentaires se manifestent en même temps et la limonite précipitée s'accumule dans la cavité à mesure qu'elle est mise en liberté. Il en résulte bientôt une imitation très parfaite des poches sidérolithiques où l'on trouve, avec la limonite, des résidus de l'attaque de la roche en argiles et sables quartzeux.

Cette expérience, tout à fait capitale, peut être beaucoup variée. Avec une solution d'un sel d'alumine elle donne une imitation des poches à bauxite; avec une dissolution de zinc elle reproduit les poches calaminaires comme on en voit à la Vieille-Montagne; avec du phosphate d'ammoniaque elle rappelle les caractères des poches à phosphorite du Quercy.

Les formes des excavations produites sont, tout naturellement et d'après ce que nous avons vu, en relation directe avec le sens de la corrosion, et c'est l'occasion

de rappeler les faits décisifs qui ont été procurés à cet égard par les coupes relevées au Laurium par M. Huet.

Ajoutons que le calcaire, mis en rapport avec les solutions manganésiennes, donne des effets remarquables. que M. Stanislas Meunier a étudiés. L'oxyde précipité, brun chocolat, n'a aucun rapport avec l'acerdère de la nature. Mais on obtient immédiatement cette dernière substance si la solution de manganèse est additionnée d'une proportion, même très faible, d'un sel ferreux. Cette conclusion s'applique aux gisements en masse d'acerdèse, comme aux dendrites, comme au *wad* des mers profondes, qui tous renferment du fer en proportions analogues à celles qui sont nécessaires pour le succès de l'expérience. Les dendrites, produites entre deux dalles convenablement rapprochées, ont souvent une grande ressemblance avec les dendrites naturelles.

Divers minéraux métalliques, comme la pyrite de fer, donnent lieu à des réactions très particulières. On est très frappé en effet de voir parmi les galets au bord de la Marche des rognons de pyrite radiée transformée en limonite, sans perte de leur forme originelle, et contrastant ainsi bien profondément avec la désagrégation du même minéral, dans les collections, sous l'influence de l'humidité.

Des expériences directes ont paru montrer à M. Stanislas Meunier que le chlorure de sodium a en effet une influence sensible sur le mode d'oxydation de la pyrite.

D'autres expériences du même auteur ont fait voir

que des sulfures métalliques, au contact de l'eau de mer, peuvent déterminer des productions intéressantes. Par exemple, le sulfure de plomb ou galène jouit de la propriété d'arrêter au passage tout l'argent qui peut se trouver dans l'eau qui le baigne, et l'on sait, depuis Malagutti et Leblanc, que l'eau de mer est nettement argentifère. Les expériences avec des solutions riches en argent donnent des produits très remarquables, et l'on voit un cube de clivage de galène abandonné quelques jours dans la solution aqueuse du nitrate argentique, se recouvrir d'une longue végétation d'argent métallique du plus élégant effet.

Cette réaction, qui doit nécessairement prendre naissance aux affleurements sous-marins des filons plombifères, révèle un procédé de triage qui concentre les métaux en certaines localités et explique la teneur fréquente de la galène en argent et même en soufre natif.

Les solutions métalliques engendrées par la production des chapeaux de filons dans les régions continentales ne réagissent pas seulement sur les roches stratifiées et avant tout sur les calcaires; elles peuvent s'infiltrer dans les parties profondes des gîtes métallifères et elles donnent alors naissance à des réactions extrêmement curieuses que M. Stanislas Meunier a étudiées avec beaucoup de détails [1].

Par exemple et comme on vient de le rappeler, la solution des sels d'argent mise en présence de la

1. Voir le détail des expériences de M. Stanislas Meunier dans son ouvrage intitulé *les Méthodes de synthèse en minéralogie*, p. 309 (1892).

galène donne naissance à un dépôt d'argent métallique qui se présente avec l'allure ordinaire de l'arbre de Diane, bien que la théorie de la réaction soit bien différente d'un cas à l'autre.

De même, une solution aurique donne une végétation d'or au contact de la pyrite de fer; et les solutions de tous les métaux lourds sont capables de précipitations variées au contact de divers sulfures.

Une autre conséquence curieuse concerne la production et l'accumulation du gypse, ou sulfate hydraté de chaux, en certaines localités. L'attaque du calcaire par le sulfate de fer donne lieu, comme M. Stanislas Meunier l'a signalé, à du gypse qui cristallise très facilement. Les cristaux gypseux des fausses glaises parisiennes sont facilement rattachables à cette origine.

Dans la région du Mariout en Égypte, étudiée par M. Fourtau, l'association du gypse à des grès fortement ferrugineux conduit l'auteur à rattacher la pierre à plâtre à la réaction mutuelle du sulfate de fer (pyrite oxydée) et de sources calcaires.

La terre végétale, ainsi que l'expérience le démontre, se ressent, dans une très large mesure, de l'activité chimique relative des calcaires et des sels métalliques provenant de l'oxydation des sulfures et spécialement de la pyrite de fer. C'est ainsi que le sol qui recouvre les couches du calcaire pyriteux se trouve en général absolument privé de chaux. Le sulfate de fer, agissant sur le calcaire, a produit de la limonite qui se mélange au calcaire et au sable résiduel, et le sulfate de chaux

est entraîné par les eaux. C'est un fait auquel les agronomes n'ont pas assez accordé d'attention et qui a une énorme importance pratique.

Une dernière conséquence des faits qui précèdent réside dans un mécanisme qui remet en liberté une proportion notable d'acide carbonique qui paraissait immobilisée dans l'épaisseur du sol à l'état de calcaire. En effet, les réactions dont nous venons de parler, et spécialement l'action du sulfate de fer sur la chaux carbonatée, en dégagent l'acide carbonique, dont on a constaté parfois la réalité avec une très grande certitude. C'est, par exemple, ce qui est arrivé à Rochebelle (Gard) le 28 juillet 1879, où une explosion s'est produite dans des conditions qui ont été étudiées en détail par Delesse.

M. Stanislas Meunier a facilement modifié l'appareil décrit plus haut, p. 199, pour le rendre propre à la récolte de l'acide carbonique résultant de la réaction du sulfate de fer sur le calcaire.

CHAPITRE VI

La sédimentation éolienne.

Le dépôt des matériaux pierreux charriés par les vents a pu être l'objet de quelques expériences que le moment est venu d'indiquer en peu de mots. Elles présentent plus d'intérêt, comme on va le voir, qu'on ne se le serait imaginé tout d'abord.

On pourrait diviser le sujet en deux parties relatives, l'une au dépôt en air agité, et l'autre au dépôt en air calme, ce qui correspond assez bien, dans le domaine aqueux, à la sédimentation pluviaire et à la sédimentation marine ou lacustre. Mais l'expérience n'a été fructueuse jusqu'ici que dans la première direction.

La forme la plus simple de sédimentation en air agité est connue sous le nom de *dunes*. M. Stanislas Meunier en a reproduit tous les caractères par un dispositif extrêmement simple (fig. 32). Et l'imitation s'est étendue non seulement aux caractères de formes, mais au phénomène de la progression des bourrelets

sableux. Il y a lieu de signaler le triage des grains arénacés, comme par un vrai vannage, qui rappelle les séparations obtenues dans les cours d'eau.

L'appareil consiste en une soufflerie agissant sur une surface horizontale ou inclinée sur laquelle du sable a préalablement été déposé d'une manière uni-

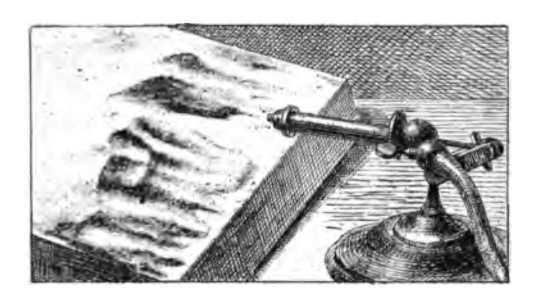


Fig. 32. — Reproduction expérimentale des dunes de sable.

forme. Au bout d'un instant, les bourrelets se constituent. Des expériences ont concerné l'imitation des sillons qui entourent les objets fixes placés dans les dunes et, par exemple, le clocher de l'église de Zuydcoote (Nord). En effet, si l'on place un cylindre vertical dans le sable, on voit, sous l'action du vent réfléchi par l'obstacle, se faire dans le sable un entonnoir tout à fait caractéristique.

En arrière des bourrelets, le dépôt des poussières a lieu d'une façon uniforme et dans les expériences de production artificielle des dunes, dont nous venons de parler, l'auteur a toujours vu des surfaces plus ou moins considérables se recouvrir d'un lit de sable sensiblement égal.

Mais un point spécialement intéressant de ces études synthétiques concerne l'explication qu'elles ont procurée de la conservation des *pistes fossiles* et des autres vestiges auxquels on a donné d'une façon générale le nom de *traces physiques* : gouttes de pluie, rides produites par le vent, craquellements dus au soleil, etc.

M. Stanislas Meunier a fait voir que toutes les hypothèses émises antérieurement sont insoutenables. Ainsi l'idée qui semblait le plus simple consistait à croire que la mer en remontant apportait du sable qui remplissait les pistes laissées sur le rivage pendant la marée basse. Mais on constate que le plus sûr effet du flot est, au contraire, d'effacer tous ces vestiges de la manière la plus complète.

A l'aide d'expériences qu'il a variées beaucoup, M. Stanislas Meunier est arrivé depuis longtemps à sanctionner complètement l'idée qu'il avait émise le premier, que les pistes fossiles, ainsi que les diverses traces physiques, résultent d'un processus éolien[1].

L'observation apprend d'abord que parmi les combinaisons fort diverses qui ont pu être réalisées dans la nature, la suivante se montre à l'œuvre sur plusieurs points de nos côtes et semble devoir être très efficace : une flaque d'eau existant au-dessus de la zone accessible à la haute mer, un animal y imprime sa trace sur le fond argileux. Si le vent vient ensuite à souffler, le sable charrié, au lieu d'aller collaborer à la dune voisine, pourra tomber dans la flaque. Il viendra

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CVI, p. 434, 1888.

former une couche sur l'empreinte, qui ne subira pendant ce temps aucune action tendant à l'effacer. En dehors de la flaque, quelques gouttes de pluie auront pu creuser leurs cupules dans le sol que le soleil pourra en outre craqueler; c'est encore le vent qui apportera le sable, destiné peut-être à devenir grès plus tard, dont toutes les excavations se rempliront.

On arrive donc ainsi, et c'est la première fois que cette conclusion est proposée, à admettre pour le grès à *Cheirotherium*, comme pour les roches à *Ornithichnites* du Colorado, une origine éolienne; c'est la seule qui puisse satisfaire aux conditions du problème. La flaque d'eau n'est d'ailleurs pas indispensable; le sable apporté par le vent sur le sédiment qui a reçu l'empreinte donnera, même à sec, le résultat désiré.

Si l'on veut faire application de ces faits à l'histoire des bilobites qui sont évidemment marins, il faudra tout d'abord éliminer l'incompatibilité, sur laquelle on a glissé trop facilement, qui existe entre ces deux faits :

1° Que leur persistance exige qu'ils aient pris naissance loin du littoral où les vagues effacent les pistes;

2° Que la nature gréseuse de la roche qui les contient réclame, non moins impérieusement, comme générateur, un courant rapide.

Or on ne voit qu'un procédé pour sortir d'embarras, c'est d'admettre que les êtres dont les bilobites seraient les pistes suivant l'opinion de M. Nathorst, par exemple, auraient dû se mouvoir dans le fond d'abîmes marins parfaitement tranquilles, tandis qu'au-dessus le vent

charrierait du sable qui tomberait dans l'eau, en pluie pareille à celle qui, tout à l'heure, se précipitait dans les flaques du littoral. Dans certains cas, au-dessus d'abîmes profonds, un courant aqueux de surface, charriant du sable, pourrait peut-être réaliser le même

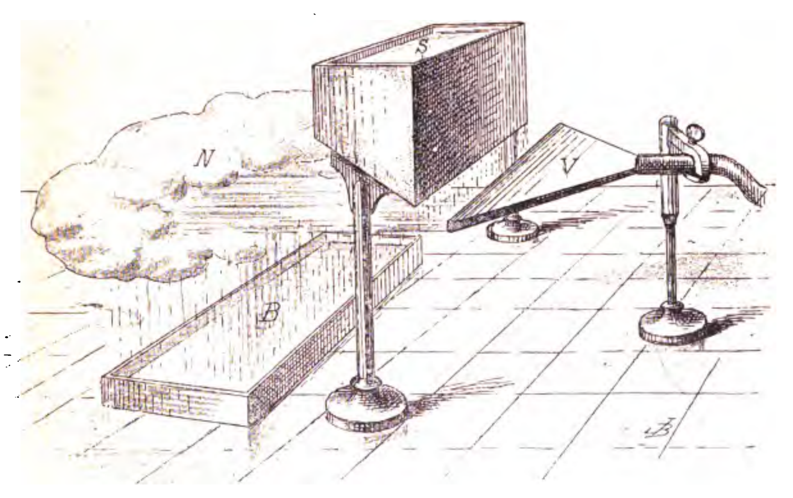


Fig. 33. — Appareil pour l'imitation expérimentale des pistes fossiles : S, réservoir rempli de sable fin ; V, tuyère dont le vent lance horizontalement le sable sous forme du nuage N ; B, bassin contenant de l'eau sous laquelle est l'empreinte à conserver et dans laquelle tombe le sable.

effet ; mais, d'habitude, le mécanisme a dû être essentiellement éolien.

Quoi qu'il en soit, l'expérience est venue confirmer pleinement cette manière de voir et l'appareil dont M. Stanislas Meunier s'est servi (fig. 33) est des plus simples. Dans un bassin rectangulaire B on a disposé une couche d'argile plastique et on y a tracé, à l'aide de deux agitateurs en verre attachés ensemble et parallèlement l'un à l'autre, des doubles sillons imitant gros-

sièrement le produit de moulage des bilobites naturels. L'argile est ensuite recouverte d'une couche de 2 à 3 centimètres d'eau gommée — la gomme n'ayant d'autre but que de jouer le rôle des ciments minéraux dans les grès. On dispose alors le long du bassin un réservoir S rempli de sable fin, qui d'ailleurs s'en écoule d'une façon continue par une étroite fissure ménagée tout le long de l'arête la plus inférieure. Le sable qui tombe est repris au moment même de sa chute par un violent courant d'air horizontal, fourni par une tuyère V, et converti ainsi en un nuage N qui se résout en pluie au-dessus du bassin. Au bout d'un temps convenable, toute l'argile est recouverte de sable, et l'on peut continuer jusqu'à ce que le bassin en soit rempli. Il n'y a plus alors qu'à laisser sécher; la gomme colle ensemble tous les grains de sable et l'espèce de grès ainsi obtenu peut se détacher d'un seul morceau de son support argileux. La figure 34 représente l'effet obtenu et un coup d'œil suffit pour montrer sa parfaite conformité avec les bilobites naturels. On peut évidemment mouler de cette façon toutes les empreintes que l'on voudra et l'on n'aurait pas plus de difficultés à imiter les gouttes de pluie fossiles, ou le vent fossile, ou le soleil fossile rappelés tout à l'heure.

Deux autres sortes de produits éoliens ont aussi été obtenus artificiellement dans des conditions qui ont considérablement éclairé la question de leur origine. D'abord les laves filées connues sous le nom de *cheveux de Pelée* parmi les naturels des îles Hawaï et qui se produisent quand on lance un courant d'air à la surface

d'un bain de verre fondu. Et, d'un autre côté, les espèces d'oolites ou de boules, comme on en trouve dans les cendres du Krakatoa [1].

On a trouvé, par exemple, il y a une vingtaine d'années des boules, constituant une vraie suie gra-



Fig. 34. — Imitation expérimentale des bilobites.

nulée, dans les conduits des cheminées de l'usine à gaz de Vaugirard.

Enfin M. Stanislas Meunier a reproduit une des singularités les plus remarquables des poussières d'origine éolienne recueillies dans les localités les plus diverses. Il s'agit de petites sphérules très lisses, pourvues parfois d'une tubulure, et qu'on a recueillies non seulement dans le résidu de fusion de la neige, ou dans

1. Stanislas Meunier, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CIV, p. 95, 1887.

les dépôts lentement accumulés dans d'antiques monuments, mais aussi dans les sédiments marins de l'époque actuelle et de la plupart des époques antérieures. Il semble qu'on doive rattacher ces globules à la combustion des fers météoriques entrant dans l'atmosphère et à la solidification brusque de petites lamelles d'oxyde fondu. Déjà on sait que le résultat de la combustion du fer dans l'oxygène, que l'oxyde des battitures, que le produit du choc du briquet consistent en globules analogues. Pour en étudier de plus près les conditions de formation, il y a tout avantage à substituer à l'oxyde métallique une matière beaucoup plus fusible : la cire à cacheter fondue et placée dans une pipette en verre à orifice très ténu. En injectant de petites gouttelettes dans de l'eau froide, on reproduit toutes les particularités des globules naturels [1].

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CIV, p. 1135, 1884.

CHAPITRE VII

Complément d'observations sur les produits des divers ordres de sédimentation.

Le retrait des sédiments.

Quelle que soit leur origine, les masses sédimentaires une fois constituées peuvent devenir le théâtre des phénomènes secondaires dont la méthode expérimentale a permis de compléter l'étude.

L'un des plus importants, à bien des points de vue, concerne le retrait spontané des sédiments.

Nous avons vu antérieurement, d'après l'expérience, que, même au sein de l'eau, un sédiment donné et dans des conditions déterminées, contient une certaine proportion d'eau qui ne peut être dépassée, mais qui varie d'un cas à l'autre.

Il y a lieu à cet égard de distinguer les deux catégories de sédiments, les uns fermes, constitués par des argiles ou des sables dont les molécules possèdent une adhérence mutuelle notable, et les autres, coulants, dans lesquels les corps lourds peuvent pénétrer et

s'enliser, comme on dit dans le pays du Mont-Saint-Michel.

Une fois sorties de l'eau, soit par soulèvement, soit par recouvrement de sédiments nouveaux, les masses dont il s'agit doivent subir une dessiccation relative et la rétraction qu'elles éprouvent se traduit ordinairement par la production de fissures dont la considération est intéressante à deux points de vue différents : d'abord, parce qu'elles sont, par leur ensemble, comme un stéréogramme des actions endodynamiques dont les roches sont le théâtre; en second lieu, parce que ces vides se sont parfois constitués en localités propres à la genèse de minéraux cristallisés.

Aussi est-il indiqué de soumettre le sujet à l'étude expérimentale et tout d'abord importe-t-il de mesurer l'intensité de retrait dans certains cas très définis.

Collin, dès 1846, étudiant le glissement des terres argileuses, fit l'expérience suivante :

Un vase cubique en cuivre, de 10 centimètres de côté, ouvert à sa partie supérieure, a été rempli d'argile bien comprimée comme un corroi. Ce vase a été exposé alternativement à l'air libre et clos, au soleil et à l'ombre, durant trois mois, par une température moyenne de 18°. Après ce temps, le cube d'argile qui remplissait le vase de 10 centimètres de côté, s'étant contracté, ne présentait plus que 0 m. 0945 de longueur sur chacune de ses trois faces.

La figure ci-jointe montre l'expérience réalisée par M. Stanislas Meunier pour rendre très sensible aux yeux la valeur du retrait de l'argile (fig. 35). La

cuvette ABCD était à l'origine pleine d'argile plastique. Après dessiccation, le retrait avait amené la plaque au tracé A′B′CD′. Cette fois, le retrait linéaire est de 13, 33 p. 100. L'auteur a donné à l'expérience une autre forme (fig. 36) qui pourra avoir des consé-

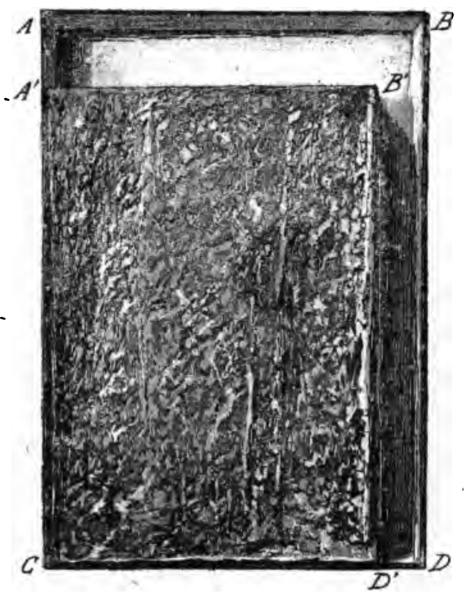


Fig. 35. — Expérience relative au retrait de l'argile par dessiccation.

quences de géodynamique, en ne permettant le dessèchement d'une plaque d'argile que sur l'une de ses faces. Dans ces conditions, il se produit une torsion dont l'énergie est tout à fait surprenante. La figure représente le résultat obtenu en laissant sécher une plaque plane de 1 centimètre d'épaisseur dans une cuve de carton dont le fond est en verre et dès lors imperméable. La dessiccation de la face libre amène

une torsion tellement énergique que le verre, malgré son épaisseur de plus de 1 millimètre, se brise en plusieurs directions.

Un résultat tout à fait ordinaire de cette sorte de dessiccation, c'est la réduction des couches en prismes, par des fissures plus ou moins perpendiculaires aux



Fig. 36. — Expérience relative à la torsion que peut développer le retrait de l'argile.

plans de stratification. Il y a longtemps qu'on a imité le fait d'une manière artificielle dans la préparation des pains d'amidon.

Mais il est des cas où le retrait affecte une régularité géométrique et qui doit faire supposer des conditions spéciales dans sa genèse. Par exemple, on connaît dans le val de Tignes, en Tarentaine, des calcschistes qui sont traversés de fissures parallèles entre elles et incrustés de minéral de seconde formation : il paraît évident que la roche a subi un étirement qui l'a tronçonnée

et que les tronçons ont été soudés ensuite les uns aux autres par des concrétions. C'est ce que l'expérience confirme, comme l'a montré M. Stanislas Meunier.

Une bande de caoutchouc, disposée dans un appareil qui nous servira plus loin à diverses reprises et que nous avons déjà mentionné à propos des crevasses glaciaires, reçoit une mince couche de stéarine; après refroidissement, on tend le caoutchouc et on voit se faire des crevasses dont l'analogie avec celles de la roche naturelle est tout à fait remarquable.



Fig. 37. — Imitation expérimentale de la réduction des sédiments et polyèdres pseudo-réguliers.

Un autre cas plus net encore concerne la réduction de certaines couches en polyèdres dont les formes sont si constantes qu'on a cherché, à une certaine époque, à y voir des effets de cristallisation. C'est ce qu'on constate, par exemple, dans maintes couches de houilles et surtout de schistes, d'âges d'ailleurs très différents d'un cas à l'autre. Les mâclines de Vire, les schistes de Saint-Sauveur, les phyllades d'Angers, présentent de ces blocs *pseudo-réguliers* avec une abondance extrême.

Il n'est pas légitime de voir, dans ces produits, des résultats de la torsion des couches, comme M. Daubrée avait essayé de le faire. Nous verrons que les expériences par torsion donnent des formes très diffé-

rentes des formes naturelles. Au contraire, M. Stanislas Meunier a montré que des actions exercées dans le plan des couches considérées, sont tout à fait efficaces et fournissent des imitations rigoureuses des faits naturels. C'est exactement avec l'appareil qui vient d'être cité que l'auteur a opéré, mais il s'en est servi d'une façon inverse, au moins en apparence. En effet, il n'étale la stéarine qu'après avoir étendu le caoutchouc, et c'est en relâchant celui-ci, très peu d'ailleurs, après refroidissement, qu'il obtient les cassures conjuguées de la figure 37, qui donnent des rhomboïdes géométriquement réguliers.

En réfléchissant un peu, on reconnaît cependant qu'il s'agit ici autant d'une extension que d'un refoulement. Le caoutchouc relâché s'élargit, en effet, et il se fait sur son enduit un retrait tout à fait évident.

Il ne faut d'ailleurs pas oublier que si la dessiccation amène une diminution de volume dans les sédiments, il y a quelques actions qui développent à l'inverse comme un foisonnement des couches; par exemple, l'hydratation qui peut déterminer la transformation de l'anhydrite en gypse, amène une variation de volume extrêmement considérable. Les expériences ne sont pas encore complètes à cet égard.

LIVRE II

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PHÉNOMÈNES D'ORIGINE PROFONDE

PREMIÈRE PARTIE

APPLICATION DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE A L'HISTOIRE DES PHÉNOMÈNES CHIMIQUES D'ORIGINE PROFONDE

Contrairement à ce que nous avons fait jusqu'ici, il nous faut aborder maintenant l'examen de phénomènes géologiques dont le moteur ne doit plus être recherché dans le foyer d'activité externe, c'est-à-dire dans le soleil, mais dans un centre d'énergie situé aux plus grandes profondeurs du globe et qui constitue comme le cœur de l'organisme tellurique.

Le mode d'action de ce centre d'énergie est d'ailleurs fort intéressant et mérite d'être précisé. La chaleur qui en émane communique aux substances constitutives de la croûte, une activité chimique qui se traduit par la constitution de nombreuses catégories de

produits, mais elle doit être appliquée d'ordinaire sur les corps qui en subiront les effets, non pas simplement par rayonnement, mais par l'intermédiaire de substances fluides extrêmement mobiles, et dont la présence se signale par des effets de minéralisation sur lesquels on n'a pas toujours eu une opinion très nette.

Quand nous plaçons dans un creuset, sur un foyer ardent, une substance fusible et que nous la fluidifions, nous pouvons dire que la chaleur seule a déterminé l'effet observé. Mais si nous envoyons sur la substance en expérience, une vapeur ou un gaz chaud, l'action de la chaleur est compliquée par celle de la vapeur ou du gaz. Même si, après l'expérience, la substance n'a retenu aucune particule du réactif fluide (et le fait est très fréquent), son rôle n'est pas moins manifeste.

Par exemple, tandis que la fusion sèche vitrifie les roches granitiques, ainsi que Buffon y a déjà insisté, la chaleur en vase clos, en présence de l'eau sous forte pression, amène la production du quartz, du feldspath, du mica et de bien d'autres minéraux anhydres à l'état parfaitement cristallisé.

Malgré la netteté de ce fait, qui est de première importance et sur lequel nous allons revenir avec quelques détails, il y a lieu de mentionner des résultats expérimentaux procurés par la chaleur sèche et qui sont d'application directe à plus d'un phénomène naturel.

CHAPITRE PREMIER

L'origine des roches cristallines.

En abordant le résumé de quelques expériences relatives à la lithogénie générale, il faut tout d'abord rappeler la pulvérisation que subissent les roches granitiques chauffées dans un creuset au rouge naissant, c'est-à-dire bien au-dessous de leur point de fusion. Le fait a sans aucun doute beaucoup d'intérêt pour l'histoire de certaines formations géologiques et, avant tout, pour l'origine des alluvions verticales du genre de celles qui remplissent les « pans » de l'Afrique australe et qui se signalent par leur richesse en diamant[1]; du genre aussi des sables kaoliniques des environs de Paris[2] sur lesquels quelques géologues ont émis des hypothèses si complètement insoutenables.

1. Stanislas Meunier : Composition et origine du sable diamantifère de Du Toit's Pan, Afrique australe. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, séance du 5 février 1877.
2. Stanislas Meunier : Mémoire sur les alluvions verticales; *Bulletin de la Société impériale des naturalistes de Moscou*, année 1876.

La vitrification et la dévitrification des roches.

En second lieu, la vitrification ignée des roches feldspathiques demande à être étudiée directement, et ceci à un double point de vue : d'abord il y a dans la nature quelques roches vitreuses comme les obsidiennes, les ponces, les gallinaces, les rétinites, etc., et d'un autre côté, il y a évidemment urgence à se demander si plus d'une roche cristalline ne dérivent pas d'une vraie dévitrification.

Or, les études auxquelles on a soumis les roches vitreuses, d'ailleurs exceptionnelles, ont prouvé surabondamment qu'elles ne sont point comparables à nos verres d'origine purement ignée. Il est même remarquable que ces roches vitreuses, malgré leur homogénéité, sont plus riches encore que les roches cristallines en substances élastiques retenues par occlusion. Parmi ces substances figurent outre l'eau, qui est la plus abondante, l'acide chlorhydrique, parfois l'acide carbonique et divers composés organiques, sur le rôle géogénique desquels l'attention n'a peut-être pas été suffisamment arrêtée.

Cette circonstance, comme M. Stanislas Meunier y a insisté, rend très spéciale la série des essais qu'on peut tenter pour obtenir des reproductions de roches cristallines, par la dévitrification des verres naturels. Dans une série d'expériences installées, les unes à la faïencerie de Choisy-le-Roi, les autres à la cristallerie

de Saint-Gobain, l'auteur a montré[1] que l'opération de dévitrification doit être précédée de la substitution au verre naturel d'un verre obtenu en extrayant du précédent tous les corps volatils qu'il contient. En soumettant ensuite ce verre à des conditions analogues à celles qui, avec le verre artificiel, donnent la célèbre « porcelaine de Réaumur », on arrive à faire cristalliser quelques minéraux, mais avec la persistance constante d'une énorme masse de verre ambiant.

M. Vernadsky a montré de son côté que la porcelaine de Montereau chauffée vingt-quatre heures au blanc, et sans qu'elle soit le moins du monde ramollie, engendre des aiguilles innombrables de sillimanite; le résultat, reproduit avec le disthène, ne semble pas susceptible d'application directe à la géogénie.

Nous devons faire cependant ici une place à un travail de MM. Fouqué et Michel Lévy sur la reproduction de diverses roches volcaniques par des procédés purement ignés et intervention de la dévitrification. Mais nous ne craindrons pas d'insister sur les différences incontestables de ce mode opératoire avec la voie adoptée par la nature, dans le laboratoire des volcans.

Ce travail se rattache du reste de la manière la plus intime à la célèbre expérience réalisée en janvier 1798 par James Hall et qui lui procura une imitation du « whinstone » des environs d'Edimbourg, variété d'ophite qui renferme, comme on sait, de grands cristaux d'olivine noyés dans un magma microlithique

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, séances des 18 septembre et 4 décembre 1876.

constitué par du labrador et de la magnétite avec traces d'augite. Le 17 janvier, une première application du feu transforme le whinstone en un vrai verre sensiblement homogène et où l'on n'aperçoit plus trace de la structure primitive. Le 27 janvier, une nouvelle expérience est faite en ménageant au creuset un refroidissement extrêmement lent : le produit manifeste alors l'apparence de la roche initiale et les études récentes y retrouvent les mêmes minéraux. Toutefois, ces minéraux diffèrent des éléments naturels par un caractère essentiel : l'absence des inclusions gazeuses si visibles dans ceux-ci et qui doivent être considérées comme des échantillons du milieu générateur.

C'est la même objection qu'on peut faire aux expériences modernes de MM. Fouqué et Lévy, sans en compter une autre sur laquelle nous insisterons plus loin et qui concerne l'ordre de consolidation relative des minéraux constituants.

Quoi qu'il en soit, le travail de James Hall constituait le premier cas de reproduction artificielle d'une roche éruptive et la portée en fut énorme, dans la grande discussion des huttoniens ou plutonistes contre les wernériens ou neptunistes. Les objections se multiplièrent et il fallut, pour les lever, recommencer l'expérience, sur la demande du D[r] Hope, avec la même matière, dont on constata d'abord l'état vitreux pour en reconnaître ensuite la cristallisation.

Dans leurs essais, MM. Fouqué et Lévy, après avoir réalisé des imitations de divers minéraux isolés, comme la néphéline et l'amphigène, se sont attaqués à la syn-

thèse du basalte. Ils soumettent à la chaleur, dans un creuset de platine, un mélange pulvérisé de 6 parties d'olivine, 2 d'augite et 2 de labrador et constatent qu'après quarante-huit heures de séjour à la température du rouge blanc, le culot consiste en une masse vitreuse, empâtant des cristaux de péridot et de petits octaèdres de magnétite. Le produit, chauffé de nouveau pendant quarante-huit heures au rouge cerise, convertit presque tout son magma vitreux en un mélange microlithique de labrador, d'augite et de magnétite.

De même, la fusion du mélange d'anorthite et d'augite qui constitue l'ophite, donne au rouge blanc la cristallisation de l'anorthite dans un culot vitreux; puis, au rouge vif, l'augite prend la structure qu'il a dans les roches ophitiques, c'est-à-dire celles de plages étendues englobant les grains feldspathiques.

D'autres imitations du même genre ont été réalisées, par exemple celles de la dolérite, de l'eukrite, etc.

Mais il faut le répéter, malgré l'intérêt de ces expériences, plusieurs détails essentiels des roches éruptives ne sont pas imités et spécialement, outre les particularités déjà mentionnées, les grenailles parfois filamenteuses ou lamellaires, engagées jusque dans les fissures de clivage des minéraux et consistant en fer oxydulé, en fer chromé ou même en métaux libres comme le fer carburé des dolérites d'Ovifak ou le platine ferrifère des ophites de l'Oural.

On verra plus loin comment l'intervention d'un réactif gazeux perfectionne dans une très large mesure la solution du problème.

CHAPITRE II

Le métamorphisme.

Le métamorphisme de contact.

A côté des faits résumés dans le chapitre précédent, il est encore un argument extrêmement puissant pour permettre d'affirmer que les expériences de genèse des roches éruptives par la voie purement sèche, méconnaissent un des traits essentiels de cette catégorie de formations. C'est celui qu'on doit tirer des effets réalisés, aux dépens des masses encaissantes, par les intrusions rocheuses. Ici encore, rien ou presque rien de ce que la chaleur seule peut produire; partout, intervention manifeste d'une active collaboration d'éléments élastiques. Aussi, la reproduction artificielle des minéraux caractéristiques des roches de métamorphisme de contact suppose-t-elle de toute nécessité l'emploi du procédé de Sénarmont dans l'eau surchauffée, capable en même temps de reproduire les espèces minérales filoniennes.

Nous reviendrons tout à l'heure sur l'appareil et les

conditions de l'expérience; notons seulement pour le moment que la collaboration des principes volatils se traduit, pour ainsi dire, par les irrégularités de frontières des auréoles métamorphiques, à la forme desquelles a présidé, d'une façon décisive en chaque point, la facilité offerte aux fluides de se mouvoir dans le sol. La disposition des marbres dérivés de la craie autour des basaltes d'Antrim, comme la forme des cornéennes autour des pointements granitiques témoignent dans le même sens.

Comme symétriques de ces transformations on doit mentionner des essais relatifs, à proprement parler, à l'endomorphisme et à l'histoire des enclaves des roches éruptives. Ils ont consisté à introduire dans du basalte fondu, mais chauffé au minimum, des fragments de roches variées, granit, calcaire, argile, etc. Les résultats ne sont pas encore complètement étudiés.

La réduction des roches avoisinées par des masses éruptives, en prismes juxtaposés, rappelant ceux dans lesquels se débitent de leur côté les masses éruptives elles-mêmes, a été reproduite, quoique d'une façon accidentelle, par le craquellement des creusets ayant fourni un long usage, par exemple pour la fabrication du verre. Toutefois, cette application de la voie purement sèche ne donne qu'une imitation approchée, et on pourrait presque en dire autant de l'expérience fondamentale de James Hall sur la conversion en vase clos de la craie en marbre. Cependant il est probable qu'ici la vapeur d'eau, quoique en très petite quantité et à l'insu de l'auteur, est intervenue dans les résul-

tats, comme nous la verrons intervenir souvent dans les expériences de Sénarmont.

Le métamorphisme général.

Les conclusions précédentes s'appliquent, sans variante, aux minéraux caractéristiques des roches composant les terrains où l'onconstate les phénomènes du métamorphisme général. Ici, la cause génératrice émane, non plus d'un pointement éruptif, mais directement de la profondeur du sol. Les effets vont en diminuant vers la surface et le fait du recouvrement progressif des sédiments anciens les y développe petit à petit avec une intensité successivement croissante.

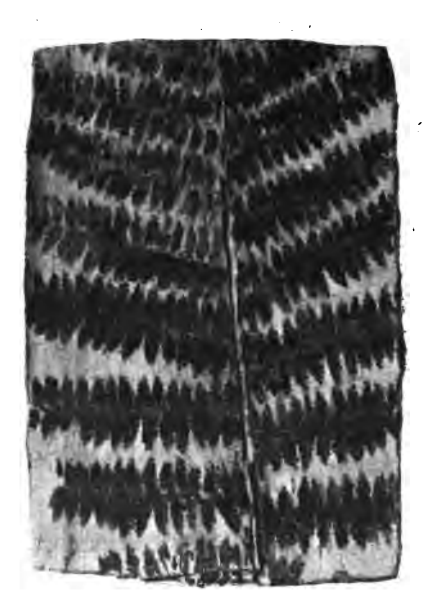


Fig. 38. — Imitation artificielle des empreintes végétales des schistes houillers.

L'identité des conditions dans ces différents cas nous conduit à voir, dans les phénomènes du métamorphisme, comme une atténuation de ceux qui ont amené la production des minéraux filoniens, et il est intéressant de souligner cette conclusion qui dérive entièrement des notions pro-

curées par l'expérimentation et qui diffère singulièrement de l'idée première qu'on aurait pu imaginer.

Parmi les reproductions d'accidents métamorphiques, on peut mentionner l'imitation de la houille par l'application de la chaleur humide sur les végétaux et, par exemple, le fac-similé des empreintes végétales des schistes houillers avec des fougères actuelles (fig. 38).

Pour les obtenir on a corroyé deux rectangles d'argile plastique de 1 centimètre d'épaisseur et on a comprimé entre les deux une feuille de fougère; puis, après une dessiccation qui doit être conduite avec le plus grand soin pour éviter les craquellements, on a porté le tout dans le moufle d'un four à une température suffisante pour cuire partiellement l'argile et par conséquent pour carboniser la matière organique. Il n'y a plus qu'à fendre l'échantillon, pour avoir une double empreinte; on facilite cette opération en plaçant, avec la feuille, une très petite quantité de sable fin entre les deux plaques d'argile.

Dans la même série et comme exemple entre beaucoup d'autres, on rappellera les expériences de Gœppert, entreprises dans le but de changer des substances végétales et animales en substances terreuses et métalliques sans altérer leur tissu ni leur structure. Il obtenait ces changements au moyen de dissolutions assez concentrées dans lesquelles il laissait tremper les objets organiques, jusqu'à ce qu'ils en fussent entièrement pénétrés. En les exposant ensuite à un feu assez vif, il détruisait le tissu organique et obtenait la substance terreuse ou métallique sous la forme végétale ou animale.

CHAPITRE III

Les filons métallifères.

Quant aux minéraux des filons, gangues et minerais, leur histoire, on peut le dire, a été complètement élucidée par l'application à leur étude de la méthode expérimentale et les résultats obtenus peuvent se répartir en deux grands groupes, suivant qu'ils résultent de la méthode de Gay-Lussac ou de la méthode de Sénarmont.

Les filons stannifères.

L'expérience capitale de Gay-Lussac, dont nous avons parlé dans l'Introduction de cet ouvrage, est venue justifier les vues d'Élie de Beaumont sur la parenté mutuelle des émanations volcaniques et des substances filoniennes. Déjà, nous avons insisté sur les conditions essentiellement géologiques dans lesquelles elle a été établie, et l'on se rappelle qu'elle a eu pour résultat la synthèse du fer oligiste, par la réaction réciproque du chlorure de fer et de la vapeur d'eau.

Le gisement des amas de contact de l'oligiste, la disposition des filons où ce minéral peut être exploité, s'accommodent aussi bien que les régions volcaniques du processus adopté par l'auteur. Et l'on sait que des variantes nombreuses en ont étendu la portée. Le problème relatif à la coque primitive du globe accentue encore ce point de vue. On verra en effet que le nombre des minéraux reproductibles par cette voie dépasse de beaucoup celui des espèces qui sont localisées dans les filons et qu'il comprend des minéraux remarquables par leur prodigieuse abondance dans les roches.

Les filons concrétionnés ou plombifères.

Pour ce qui est du travail de Sénarmont, il faut répéter, comme pour le précédent, qu'il est d'une fécondité illimitée : bien des auteurs ont borné leur activité propre à en développer des variantes.

On sait que l'appareil mis en œuvre consiste en un récipient assez solide pour lutter avec efficacité contre la tension de la vapeur à 300 ou 400 degrés, et apte à permettre la rencontre de réactifs convenablement choisis. Sénarmont employa les tubes d'acier dont on fabrique les canons de fusil et que James Hall avait déjà employés, mais il en perfectionna le mode de fermeture. Le grand progrès réalisé consiste dans l'admission de l'eau, à laquelle revient la part prépondérante dans les résultats. Pour cela, l'illustre auteur enferme des solutions salines dans un tube de verre vert fermé à la lampe et pouvant entrer aisément dans

le canon; ayant soin d'ailleurs de placer un peu d'eau dans l'espace annulaire compris entre les deux tubes de façon à conjurer, par une contre-pression, l'explosion du récipient en verre.

Beaucoup de très jolis détails pratiques pourraient être mentionnés, tels que l'artifice destiné à ne permettre le mélange des réactifs qu'au moment favorable, grâce à l'emploi d'ampoules distinctes, que de très petites bulles d'air sont chargées de faire éclater en se dilatant, etc.

Tout ce système, depuis Sénarmont, a été perfectionné : la fermeture des tubes et jusqu'à leur substance, qui est maintenant de platine; le mode de chauffage, qui peut être maintenu constant pendant un temps quelconque. Aussi le nombre des produits est-il considérable , mais les savants modernes , malgré le bonheur de leurs expériences , n'ont fait que grapiller dans le champ de Sénarmont.

La description de toutes les synthèses obtenues nous entraînerait bien trop loin; il suffira de quelques exemples dans les directions principales[1]. Tout d'abord, il importe de noter la remarquable faculté cristallogénique de l'eau chaude, c'est-à-dire la facilité avec laquelle des substances amorphes soumises à l'eau suréchauffée se transforment, sans changer de composition, en substances cristallisées.

C'est ainsi que, comme Sénarmont lui-même l'a démontré, la silice gélatineuse, chauffée entre 200 et

1. Voyez à cet égard : Stanislas Meunier, *Les méthodes de synthèse de minéralogie*, in-8, 1892.

300 degrés, se transforme en un sable dont chaque grain est un cristal. Le quartz ainsi produit est identique à celui de la nature par sa composition comme par sa forme cristalline, et celle-ci présente une foule de détails, comme des stries et des faces plagièdres, qui sont identiques avec les particularités des quartz naturels. Depuis, l'expérience a été variée : M. Daubrée en substituant du verre artificiel à la silice précipitée, puis MM. Friedel et Sarrazin en ajoutant à la silice une certaine proportion d'alcali, ont reproduit le résultat de Sénarmont, dont la réalité ne saurait être contestée.

Et les autres gangues des filons concrétionnés ont été imitées tout aussi bien que le quartz. Sénarmont a préparé la fluorine en cubo-octaèdres et la barytine en prismes orthorhombiques, en ajoutant à l'eau minéralisatrice de petites quantités de bicarbonate de soude et parfois un peu d'acide chlorhydrique.

Et ce succès si complet pour les gangues, l'auteur le réalise également pour les minerais.

L'oligiste est obtenu, soit par l'action de l'eau sur le chlorure de fer, ce qui rappelle, mais avec de profondes différences, l'expérience de Gay-Lussac, soit en décomposant dans l'eau la limonite, qui devient anhydre. Cette réaction, qui semble si étrange à première vue, se reproduit pour le gypse, qui devient de l'anhydrite, pour le sulfate de magnésie à 7 équivalents d'eau qui devient de la kiesérite, etc.

La sidérose, ou fer carbonaté, résulte de la réaction développée dans l'eau suréchauffée entre le carbonate

de soude et un sel de fer : un sable cristallisé dont chaque grain est un rhomboèdre transparent inaltérable à l'air est extrait du tube. Le carbonate de manganèse ou diallogite et le carbonate de zinc ou calamine, résultent de réactions calquées sur la précédente. Et il en est de même, ce qui complète l'ensemble, pour les gangues carbonatées, calcite, giobertite et dolomie. Même, dans cette direction, la méthode expérimentale s'est montrée entre les mains de Sénarmont capable d'attaquer des questions de minéralogie pure et on lit avec le plus vif intérêt les considérations qui portent l'auteur à se demander si, étant donnée l'influence directe de la température sur la proportion relative des deux carbonates calcique et magnétique engendrés ensemble dans la même liqueur, la dolomie a bien une existence réelle.

Parmi les synthèses les plus remarquables de cet ensemble incomparable, il faut faire une place à part à celles qui concernent les sulfures. Le contraste est absolu entre les substances cristallines extraites du tube et les matières amorphes auxquelles donne lieu le mélange des sulfures alcalins avec les sels métalliques dans les conditions ordinaires de l'analyse chimique. La galène, la blende, le réalgar, la stibine, la bismuthine, le kermès, la pyrite, l'hauérite, la millérite, le chalkopyrite, bien d'autres encore, manifestent des caractères identiques à ceux des échantillons extraits de la masse des filons.

Enfin, des composés plus compliqués se soumettent à cette synthèse sans manifester par aucun détail qu'ils

ne sortent pas directement du laboratoire de la nature : le sulfo-arséniure de fer ou mispickel, la proustite ou sulfo-arséniure d'argent, l'argyrithrose ou sulfo-antimoniure du même métal sont dans ce cas, témoignant avec une éloquence décisive du caractère hydrothermal des gîtes où ils se sont produits spontanément.

La kaolinisation et la serpentinisation.

Nous ne dirons qu'un mot de résultats expérimentaux obtenus dans l'étude de l'hydratation dont sont susceptibles certains silicates à base d'alumine, comme les feldspaths, ou à base de magnésie, comme l'olivine, les pyroxènes ou les amphiboles. Cette question de la kaolinisation et de la serpentinisation a une importance extrême au point de vue des plus hautes questions géologiques; mais les résultats ne sont pas encore complets.

M. Daubrée a produit une espèce de kaolin mal défini par le séjour de verre artificiel dans l'eau suréchauffée, mais des résultats plus nets ont été obtenus par M. C. Barus [1], qui a fait des expériences nombreuses et sur une grande échelle, dont le but principal était d'éclairer l'histoire du célèbre filon argentifère de Comstock.

Pour l'olivine, M. Stanislas Meunier en ayant maintenu une certaine quantité en fine poussière dans

1. *Geology of the Comstock lode and the Washoe district by George-F. Becker*, Washington, 1882.

l'eau portée à 150 degrés pendant une quinzaine de jours, il en a vu une partie passer à un état rapproché de celui de la serpentine.

Il y aura lieu de reprendre ces études, qui ménagent des découvertes intéressant l'histoire des roches les plus anciennes dont la croûte terrestre est constituée.

CHAPITRE IV

L'origine de la coque primitive du globe.

Les faits qui précèdent ont montré avec quelle efficacité la méthode expérimentale a pu s'attaquer à l'étude de phénomènes chimiques dont le caractère distinctif est d'émaner de l'activité qui réside dans les profondeurs *infragranitiques*.

Les roches granitiques, comme les roches filoniennes, comme les roches éruptives feldspathiques, ont été reproduites dans les détails de leur composition minéralogique et de leur structure.

Et, partout, les expériences nous ont révélé la nécessité d'une collaboration fournie à l'action propre de la chaleur, par des agents élastiques, en tête desquels figure l'eau.

Dans cette direction éminemment fructueuse et que nous n'avons pas la prétention d'épuiser, il convient encore de mentionner les lumières apportées par la méthode synthétique à l'histoire des roches silicatées magnésiennes dont le type, comme l'avait reconnu M. Daubrée, est le *péridot* et qui se signalent comme

devant représenter la substance de la croûte solide initiale du globe.

Les roches de précipitation gazeuse.

C'est en conséquence de considérations générales sur lesquelles nous n'avons pas le loisir de nous arrêter, qu'on arrive à supposer que les effets du refroidissement spontané de la nébuleuse destinée à devenir la terre, ont dû consister dans la concrétion, par le passage brusque de l'état gazeux à l'état solide, d'une coque de minéraux dont la silice, la magnésie et le fer représentaient la plus grande partie.

L'existence réelle de ces roches au-dessous du revêtement granitique nous est prouvée par l'étude des enclaves d'une foule de roches éruptives.

On peut citer surtout la dunite des basaltes, et la dolérite à fer natif d'Ovifak.

L'expérimentation permet de préciser, jusque dans des détails les plus intimes, l'économie de cette formation spéciale, et il suffira de mentionner ici quelques-uns des résultats obtenus.

M. Stanislas Meunier[1] a réalisé la synthèse des principaux silicates magnésiens, qui, comme on l'a vu, font la base et la matière principale des roches fondamentales, sans faire intervenir les procédés de fusion et dans des conditions qu'il est facile d'identifier avec celles qui, nécessairement, se sont constituées dans le milieu terrestre au moment où, pour la première fois,

1. *Savants étrangers*, t. XXVII, n° 5.

les matières fluides, gazeuses de l'origine, ont pris l'état solide : conditions réalisées à l'heure présente dans la photosphère du soleil.

Dans un tube de porcelaine, sont disposés des fils de magnésium métallique et l'on fait arriver à leur contact, deux courants gazeux, constitués l'un par de la vapeur d'eau et l'autre par du chlorure de silicium. Au moment où la température atteint le rouge sombre, une réaction très énergique se développe et, parmi divers produits dont les proportions varient avec les conditions de l'expérience, on rencontre d'innombrables cristaux de pyroxène magnésien tout à fait semblable, pour la composition, pour la forme et pour les détails de structure, clivages, etc., aux grains cristallins contenus dans les roches silicatées magnésiennes. Ce pyroxène se constitue à une température extrêmement inférieure à celle de sa fusion et cette synthèse contraste avec toutes celles dont les silicates avaient jusque-là été les objets. Son intérêt principal est de cadrer certainement avec les conditions primordiales dont nous parlions tout à l'heure.

En variant les proportions des corps réagissants et le mode d'application de la chaleur, M. Stanislas Meunier a produit le péridot ou olivine en petits grains pareils à ceux des dunites et des roches voisines. En substituant l'aluminium au magnésium il a fait de l'amphigène, et les minéraux felsdpathiques se sont engendrés en présence d'alcalis caustiques, potasse ou soude, ou de la chaux.

Mais, ce qui a donné un caractère plus net encore à

l'ensemble de ces synthèses, c'est qu'il a été possible d'en cimenter ensemble les produits par des concrétions métalliques, ayant tous les traits de composition et de forme de bien des éléments métalliques des roches naturelles. M. Stanislas Meunier a insisté sur deux types dans cette série : la dolérite à fer natif du Groenland et la roche mère du platine de l'Oural.

Pour ce qui est de la dolérite d'Ovifak, les granules métalliques de tous ordres en ont été imités au double point de vue de la forme et de la composition. A ce dernier égard, on sait que le métal dont il s'agit, comparable à une fonte naturelle, consiste avant tout en un carbure de fer. L'auteur l'a reproduit exactement en mettant en rapport, dans le tube de porcelaine chauffé au rouge, un courant de vapeur de chlorure de fer avec un courant d'oxyde de carbone. Il se fait un métal compact, nullement pyrophorique et dont la teneur en carbone, voisine de 4 pour 100, est fort rapprochée de celle du modèle à reproduire.

Au point de vue de la forme, l'imitation est des plus satisfaisantes[1]. Là où la place ne manque pas, le métal se constitue en sortes de tubercules arrondis qui sont comme des miniatures des blocs rapportés par M. Nordenskjold et dont on peut voir un moulage dans la galerie de Géologie du Muséum. Quand l'espace est plus restreint, par exemple dans un tube encombré de fragments de péridot ou de pyroxène, le métal comble

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, du 5 mai 1879.

les vides; il s'étale en feuille continue sur les éclats minéraux comme il s'étend sur toute la surface interne du tube; il s'insinue en lames ou en filaments tout à fait capillaires dans les fissures de clivages, et c'est un caractère fréquent des dolérites à fer natif.

On remarque tout de suite que l'ordre de dépôt des minéraux lithoïdes et des minéraux métalliques n'a rien à voir ici avec l'ordre des fusibilités, et cela peut inviter à la prudence les lithologistes qui se sont exclusivement basés sur les études faites dans des creusets. Dans une coupe du produit obtenu en cimentant des fragments pyroxéniques par la fonte, on serait porté à voir dans les granules de fer le produit d'une première consolidation après laquelle les silicates auraient pris naissance; or c'est le contraire qui est vrai.

Mais le fait s'est manifesté avec bien plus de netteté encore à propos de la roche mère du platine de l'Oural, sur laquelle M. Stanislas Meunier a arrêté longtemps son attention [1]. De la poussière de péridot et de pyroxène étant donnée, qui peut résulter des phénomènes de condensation brusque déjà décrits, l'auteur la soumet au rouge à l'action du courant gazeux où sont mélangés, avec de l'hydrogène, le chlorure de platine prépondérant et un peu de chlorure de fer. Le platine prend l'éclat métallique et s'allie à une petite quantité de fer, en affectant toutes les formes indiquées à l'instant pour la fonte : il fait des granules, des enduits, des lames et des filaments, c'est-

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CX, p. 254, 1890, et t. CXVIII, p. 368, 1894. — *Le Naturaliste* du 15 novembre 1898.

à-dire tous les accidents que M. Inostranzeff a décrits dans l'ophite platinifère de Nijni Taguilsk. Cette fois-ci l'écart de fusibilité entre le platine et le pyroxène est si considérable que la conséquence devient tout à fait évidente. Les lithologistes, étudiant la roche ouralienne, ne manquent pas de considérer les granules de platine comme étant de première consolidation; mais comment peuvent-ils imaginer que ces granules aient pris, dans le bain fondu, les formes qu'elles présentent et jusqu'à celle d'*enduit* de certains grains pierreux? La chose est absolument incompréhensible; aussi est-elle fausse, et sa fausseté a, comme on va le voir, cette conséquence de renverser ce qui a été admis pour les roches silicatées à granules de composés métalliques, y compris les granules de fer oxydulé, de fer chromé ou de fer sulfuré.

C'est une des parties principales des recherches expérimentales de M. Stanislas Meunier que celle qui concerne la genèse de ces derniers minéraux, et leur histoire vient compléter non seulement celle des roches éruptives anhydres comme les dolérites, les ophites et les basaltes, mais aussi celle des roches hydratées et spécialement des serpentines.

Il est en effet très légitime de regarder une roche silicatée magnésienne à granule de fer oxydulé comme représentant un premier temps dans la série des transformations qui se terminent à la serpentine. Tout indique que ces granules parfois si volumineux se sont constitués d'abord sous la forme de fer métallique. Dans les expériences de MM. Fouqué et Lévy,

on voit le fer oxydulé s'isoler en granules de première consolidation, mais si ces granules sont ou en octaèdres ou en petits tubercules, jamais ils n'ont la forme si fréquente dans la dolérite et dans la serpentine de masses irrégulières se continuant en apophyses ramuleuses, branchues et parfois capillaires entre les minéraux silicatés.

Au contraire, dans les produits de M. Stanislas Meunier, on voit des fragments péridotiques ou pyroxéniques soudés ensemble par du fer métallique obtenu par le séjour de ces fragments dans un tube où se rencontraient deux courants gazeux constitués, l'un par du chlorure de fer et l'autre par de l'hydrogène. La cimentation une fois obtenue avec tous les détails de formes déjà plusieurs fois mentionnés, il suffit d'en soumettre le résultat à l'action d'un courant de vapeur d'eau au rouge, pour transformer le fer métallique, sans changement de forme, en fer oxydulé possédant tous les caractères du fer oxydulé naturel.

Ce courant de vapeur d'eau est la reproduction de l'intervention naturelle, au sein des masses de première condensation brusque, des agents d'oxydation et d'hydratation, consécutifs à une diminution lentement réalisée de l'intensité de la chaleur d'origine, et c'est ce qui autorise à rattacher la serpentine à la genèse même de la magnétite.

Le phénomène s'est certainement réalisé dans la substance des roches platinifères de Nijni. Avec les granules de platine s'étaient faits des granules de

fer métallique. L'action aqueuse, en même temps qu'elle a serpentinisé la roche, a transformé le fer en fer oxydulé, tandis que les granules de platine ont complètement résisté.

M. Fouqué a tenté d'expliquer la présence de granules de fer natif dans certaines roches, en admettant que le fer oxydulé de première consolidation aurait été réduit par le passage d'un courant d'hydrogène. Mais M. Stanislas Meunier a montré que cette conception est tout à fait insoutenable. Il a réduit par l'hydrogène, au rouge et sans fusion, du fer oxydulé provenant des serpentines, et il a obtenu un fer poreux ne pesant plus que 4 au lieu de 7 et n'ayant dès lors aucune analogie avec les nodules des roches. Cette discussion est encore une confirmation à ajouter aux autres, de l'origine vraie des roches de condensation primitive.

Dans les roches il est fréquent que les nodules métalliques consistent en fer chromé. M. Stanislas Meunier a fait voir [1] que l'histoire de ce minéral, quoique un peu plus compliquée, se calque exactement sur celle de la magnétite. Il a fait passer dans un tube encombré de fragments péridotiques, un mélange gazeux contenant à la fois du chlorure de fer, du chlorure de chrome et de l'hydrogène, et il a cimenté ainsi les substances minérales avec un alliage de fer et de chrome extrêmement remarquable. Puis, dans une seconde manipulation, il a transformé cet alliage en fer chromé, par son séjour au rouge dans un courant

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CVII, p. 1153, et t. CX, p. 424, 1890.

de vapeur d'eau. Le succès a été complet et la matière produite présente, en même temps que sa forme, la composition rigourense du fer chromé de la nature.

La série dont il s'agit est encore augmentée du reste par les grains sulfurés qu'on obtient par la réaction mutuelle des chlorures métalliques et de l'acide sulfhydrique.

Si l'on réfléchit, d'ailleurs, aux conclusions de l'étude dont nous n'avons pu donner qu'un très sommaire résumé, on verra qu'elles se réduisent à dire que la coque solide du globe, qui s'est constituée la première dans l'épaisseur de la masse terrestre et qui devait avoir d'intimes analogies avec la photosphère du soleil, consiste en roches silicatées magnésiennes avec abondance de concrétions métalliques, dont la genèse se rattache aux phénomènes qui se sont continués dans la substance des filons stannifères et jusque dans les cheminées volcaniques.

Il en résulte, pour l'économie générale du globe, des vues bien différentes de celles qui ont cours habituellement et une distribution relative des matières où n'intervient plus d'une manière exclusive la considération, d'ailleurs très naïve, des densités des corps étudiés à la température ordinaire [1]. Le fer métallique, par exemple, ne se présente plus comme constituant un noyau massif, mais au contraire comme faisant une vraie coque, au-dessous de laquelle se sont consolidées plus tard les roches dont les éruptions nous

1. Voyez par exemple le diagramme publié en 1867, par M. A. Baudrimont, dans sa *Théorie de la formation du globe terrestre* (in-18, Bordeaux).

ont procuré des spécimens à toutes les époques géologiques. C'est même à cause de ce gisement spécial que ces roches, comme le basalte, ont pu nous apporter des lopins des roches initiales comme des dunites, comme les dolérites d'Ovifak, toutes pénétrés de fer non oxydé. C'est à l'extérieur de cette coque que se sont constituées les masses granitiques, considérées à tort comme les plus anciennes de toutes les roches.

Du reste, sans insister sur ces faits que nous pourrions développer beaucoup, il suffira de constater le contraste profond entre les vues qui nous sont suggérées par l'étude des produits expérimentaux et celles qui ont été émises par les purs mathématiciens (géomètres ou physiciens) traitant le même sujet, sans des éléments suffisants.

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATION DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE A L'HISTOIRE DES PHÉNOMÈNES MÉCANIQUES D'ORIGINE PROFONDE

Quoi qu'il en soit des faits qui viennent de nous arrêter, la croûte solide, une fois constituée, n'a pas seulement affaire avec les actions externes qui nous ont occupés précédemment et qui y provoquent, comme on l'a vu, des changements incessants.

Elle a aussi à compter avec des réactions mécaniques ayant leur siège dans la profondeur et qui dérivent avant tout de la contraction spontanée du globe, soumis à un refroidissement sans compensation.

Il faut bien noter que si la croûte s'est nécessairement constituée dans une situation correspondant à un état d'équilibre stable au moment de sa formation, elle n'a pas tardé à subir des efforts résultant de ce que cet état d'équilibre initial ne saurait persister toujours.

Sa vitesse de refroidissement est très faible comparée aux durées humaines. On a parlé (Bischof)

d'une perte de 1° centigrade en 9 millions d'années; et Poisson a même émis l'hypothèse d'un taux de refroidissement encore bien plus lent. Mais la perte de chaleur n'en est pas moins incontestable et elle a des effets qu'on ne peut méconnaître.

On peut, d'une façon grossière, s'en rendre compte en remarquant que le globe, pourvu de sa croûte, est comparable à un thermomètre sans tige soumis à un refroidissement continu. Si le thermomètre nous rend des services, c'est que, pour un même mouvement de température, le liquide qui entre dans sa construction subit des variations de volume bien plus grandes que le solide formant l'enveloppe, et promène son ménisque dans la tige graduée. Qu'il n'y ait pas de tige, et le refroidissement tendra à faire un vide dans le réservoir. Que l'enveloppe du réservoir soit suffisamment mince, et elle tendra à suivre son support fluide. Elle se déformera et pourra même se rompre.

Toute la géodynamique d'origine interne est comprise dans cette remarque.

Placés que nous sommes au point de vue expérimental, nous devons diviser le sujet, afin d'étudier les effets de plus en plus accentués des causes qui viennent d'être rappelées.

CHAPITRE PREMIER

Les forces cosmiques.

Nous entendons par forces cosmiques, la pesanteur et la force centrifuge, dont la collaboration et le conflit ont donné au globe terrestre ses caractères initiaux.

La pesanteur.

Une première cause d'actions, émanant de la profondeur, consiste dans la compression verticale que les sédiments se font éprouver par le fait de leur propre poids, c'est-à-dire en conséquence de la pesanteur, dont le foyer peut être considéré comme étant situé au centre même du globe.

L'effet de la surcharge, sur un sédiment donné, est multiple : il consiste dans une compression qui doit chasser une partie de l'eau d'imprégnation, puis dans une réduction de volume qui peut et doit fréquemment aller jusqu'au craquellement.

A ce titre, les essais de solidité des matériaux par la presse hydraulique, rentrent dans le cadre de diverses

expériences géologiques et procurent des coefficients de résistance dont on pourra fréquemment tirer parti pour la théorie.

Dans cette direction, on constate généralement qu'un cube comprimé tend à se briser suivant une forme pyramidale, mais certaines roches, par exemple la pierre de Soignies, en Belgique, se débitent en prismes.

Un effet constant de la compression des sédiments c'est la déformation des fossiles qu'ils contiennent, et Alcide d'Orbigny a développé à cet égard des considérations qui sont toujours dignes de la plus sérieuse attention. Les cératites de Lunéville ont souvent pris une forme qui justifie le nom de *homards* que leur donnent les ouvriers; les sigillaires et les calamites sont réduites à l'état de simples plaques très minces, etc. La presse hydraulique a permis à M. Daubrée d'imiter tous ces résultats sur lesquels nous reviendrons encore en un mot, à propos de l'origine de la schistosité.

C'est dans le nombre aussi qu'il faut citer la production des *stylolithes*. Tout le monde sait l'abondance de ces accidents, pris d'abord pour des vestiges de bois fossiles, dans des calcaires de différents âges, et spécialement dans les couches du muschellkalk. On en voit dans le néocomien, par exemple aux environs de Bérias dans le Gard; dans le bathonien de Langres et de Chaumont, ils sont nombreux. La houille présente très souvent des accidents analogues qu'on a pu prendre pour des traces d'organisation végétale.

C'est presque comme une simple aggravation des

stylolithes qu'il paraît indiqué de considérer les petites fissures de certains calcaires marneux et spécialement celles du calcaire ruiniforme de Florence.

M. Daubrée a imité les stylolithes en comprimant à la presse hydraulique des pains de savon à la glycérine ou des blocs d'argile de consistance convenable.

Le phénomène des *galets impressionnés* est certainement de la même catégorie, et c'est bien à tort que M. Daubrée a voulu y voir un résultat d'action chimique. M. Stanislas Meunier l'a imité par simple compression, après l'étude qu'il avait faite sur place, au Righi et à Heyden, dans le canton d'Appenzell.

On ne peut méconnaître que le fait de l'empilement des sédiments n'ait souvent pour effet de déterminer des foisonnements souterrains de masses plastiques comme des argiles, et dans notre Introduction nous y avons déjà fait allusion.

M. Fayol a vu de semblables *fusements* se produire dans ses expériences relatives à la constitution des deltas, et les dessins qu'il a donnés montrent que des dykes, considérés comme éruptifs, peuvent bien avoir cette origine spéciale. Il est clair que si le métamorphisme venait à s'exercer sur des apophyses argileuses du genre de celles qu'il a produites, le résultat aurait avec les filons de « dioritine » de Commentry les analogies les plus intimes.

A propos de cette action mécanique développée dans les roches par le seul fait de leur empilement, il y a lieu de mentionner ici les états successifs d'un sédiment ancien, par exemple silurien, recouvert de cou-

ches plus récentes et qui devient progressivement métamorphique. Ici encore il importe de constater le mélange des effets d'origine solaire et ceux d'origine tellurique.

Même, à la pesanteur s'ajoute, dans cette seconde direction, la chaleur propre du globe qui détermine des réactions chimiques plus ou moins intenses.

Sans nous appesantir sur ce sujet, il est utile de constater que la surcharge successive de couches données sur certains points, peut déterminer des phénomènes de torsion plus ou moins comparables à ceux que nous verrons bientôt résulter des réactions horizontales.

De façon que c'est à ce titre que peuvent être rattachées beaucoup d'actions dépendant du métamorphisme général, puisque l'empilement successif des sédiments doit être considéré comme la cause suffisante, qui a constitu éle milieu souterrain où les modifications de roches ont pris naissance.

C'est même encore à cette série que pourrait être ramenée la cause de maintes particularités du métamorphisme de structure et, par exemple, la schistosité que sait engendrer horizontalement la pression verticale des sédiments superposés dans les cas où un glissement reste possible.

Il suffit de mentionner ces conséquences et il est loisible de confondre l'examen de cette schistosité avec celle qui fait un paragraphe obligé de l'étude de l'orogénie.

La Force centrifuge.

Il faut d'ailleurs s'empresser de mentionner ici, en attendant que le sujet ait été l'objet d'études suffisamment complètes, les effets géologiques possibles d'une force antagoniste de la pesanteur et cependant

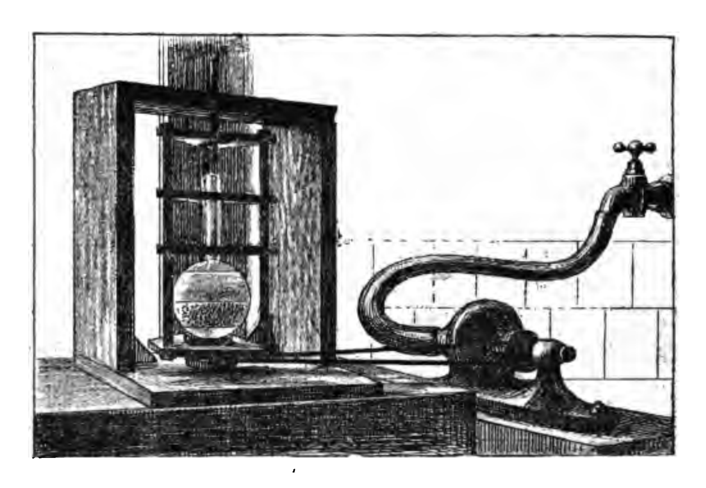


Fig. 39. — Appareil pour l'étude de la force centrifuge.

originaire comme elle de la profondeur : la force centrifuge.

M. Stanislas Meunier a fait à cet égard des expériences qui devront être continuées. L'appareil dont il se sert, représenté fig. 39, est des plus simples : il consiste en un ballon de verre solidement maintenu dans un châssis auquel une petite turbine donne le moyen d'imprimer, autour d'un axe vertical, un mouvement de rotation de rapidité déterminée. Une dis-

position spéciale permet la communication avec l'intérieur du ballon, même pendant la rotation.

Il est intéressant de remarquer que la vitesse de rotation pour les expériences, à première vue considérable, n'est pas plus grande que celle dont Plateau se sert dans les siennes qui sont regardées unanimement comme éclairant les phénomènes cosmogoniques. Les conséquences sont donc également légitimes dans les deux cas.

Si l'on se rapporte à notre chapitre antérieur (voyez pages 241 et suivantes), sur l'origine de la coque primitive de la terre, on reconnaîtra que celle-ci résulte avec toute vraisemblance d'une précipitation brusque aux dépens de masses jusqu'alors fluides et sans doute gazéiformes. Ceci posé et étant donnés aussi, d'une part la mobilité fluidale de la masse génératrice, et d'autre part le mouvement de rotation sur elle-même dont cette masse est animée, on arrive logiquement à se demander s'il n'est pas possible de concevoir quelques particularités dynamiques de la concrétion primitive.

Or, la force centrifuge a dû intervenir pour classer les matériaux dans un ordre différent de celui qui déterminerait la seule différence des densités dans un milieu immobile et cette influence de la force centrifuge, variable avec la distance au centre de la zone considérée, a dû changer considérablement au cours des consolidations successives.

C'est à l'aide du dispositif indiqué plus haut que M. Stanislas Meunier a essayé de représenter les conditions les plus générales des phénomènes dont

il s'agit. Il va sans dire d'ailleurs que, ne pouvant échapper à l'influence de la terre, nous n'avons à nous occuper que de la disposition obtenue dans le plan de l'équateur : il en résulte une grande simplification du problème et une application directe au triage des matériaux terrestres.

Si l'on met dans le ballon de la stéarine en fusion, de la poussière de granit et de très fines grenailles de plomb, on voit, après refroidissement et consolidation, le plomb constituer une ceinture équatoriale soutenue successivement par du granit et de la cire qui fait la masse centrale. L'aspect général rappelle celle de la planète Jupiter. L'ordre des superpositions est exactement inverse de l'ordre des densités. D'où l'on peut conclure qu'il a dû y avoir en bien des régions du globe un vrai conflit entre l'attraction et la force centrifuge.

Ceci posé et les expériences ayant été variées de façons très nombreuses, on met dans un ballon une solution de chlorure de baryum et on y fait tomber avec une pipette, pendant la rotation, un peu de sulfate de soude goutte à goutte; on voit le sulfate de baryte précipité venir se concentrer dans la zone équatoriale et, dans certains cas, y acquérir une cohésion qui lui permet de subsister dans cette situation, même après l'arrêt de l'appareil.

L'application de cette expérience à la genèse de la coque primitive est tout à fait directe et contribue à justifier les conclusions d'un chapitre précédent.

On devra sans aucun doute modifier, en conséquence de ces expériences, les idées généralement admises

sur la constitution des régions internes du globe et, par exemple, celles que Roche s'est attaché à préciser d'une manière si savante. Il semble évident que les régions les plus profondes sont destinées à se constituer à l'état d'une vaste *chambre vide* lors de la consolidation enfin réalisée de toutes les substances du globe; le volume du solide définitif devant être prodigieusement inférieur à celui du fluide chaud originel.

CHAPITRE II

Les volcans.

Rôle de l'eau dans le phénomène volcanique.

On peut dire, malgré l'apparence paradoxale de la proposition, que les volcans sont avant tout des sources d'eau.

Le cube de vapeur aqueuse qui sort des volcans pendant les éruptions est immense.

Les laves, une fois épanchées, se montrent comme imprégnées d'eau et d'autres substances élastiques qui se dégagent spontanément sous forme de *fumerolles*, et qui sont partiellement retenues par occlusion dans les roches vitreuses comme les obsidiennes.

C'est l'eau qui, par la force expansive de sa vapeur, paraît avoir été l'agent de perforation de la croûte terrestre, traversée par les cheminées volcaniques. M. Daubrée, ayant recours pour la commodité des expériences à d'autres corps explosifs que l'eau, a montré comment des gaz soudainement dégagés, peuvent creuser, au travers de fragments pierreux, des conduits comparables aux cheminées dont il s'agit. Il a fait voir aussi que les roches sont réduites en parti-

cules comparables aux cendres et aux lapilli des volcans. L'efficacité, comme moteur gazeux, de la vapeur d'eau est donc légitimée.

Quant à l'imitation de la forme des cônes de lapilli, elle a été réalisée par M. Behrens dans des expériences ingénieuses. Il fait arriver dans le fond d'une caisse pleine de sable fin, le tuyau vertical d'une soufflerie à jet d'eau ascendant et il voit se constituer bientôt un cône qui contient une cavité en entonnoir qui n'est d'ailleurs pas toujours circulaire. Parfois il se fait dans le cône des cavités analogues à celle qui existe dans les flancs de certains volcans; l'auteur les a moulées en y injectant du plâtre gâché.

En chauffant, avec une flamme de gaz, un mélange d'argile fluide, de bicarbonate de soude et de sciure de bois, déposé dans une capsule plate, M. Behrens a déterminé au-dessus du point échauffé, la surrection du cône qui laisse épancher la bouillie par son sommet pendant qu'au pied il se fait une dépression annulaire.

Beaucoup d'autres expérimentateurs ont collaboré à la même question. Lemery lui-même obtenait un résultat qui n'est pas aussi dépourvu d'intérêt qu'on pourrait le croire. M. Gorini a publié à cet égard un mémoire qu'il faut rappeler.

Selon M. Bergeron, on peut obtenir très simplement la représentation de certaines particularités volcaniques à l'aide de métaux fondus dans lesquels, pendant leur solidification, on fait arriver de bas en haut un courant d'air; et le géologue Bombicci a cité avec détail et a dessiné une production de cônes avec cra-

tères pendant le rochage d'une masse de 2000 kilogrammes d'argent [1]. D'autres essais, comme ceux de M. Harrisson, pourraient être cités.

Poulett Scroppe a décrit une expérience que M. Stanislas Meunier a perfectionnée. Les figures 40 et 41 ci-

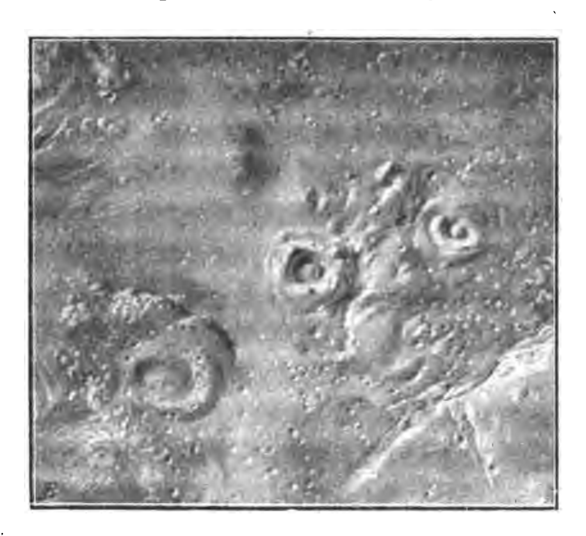


Fig. 40. — Imitation expérimentale des cratères volcaniques (grandeur naturelle).

jointes montrent comment les résultats ressemblent dans certaines limites à la carte en reliefs de nos districts volcaniques. Ils ont été obtenus en soumettant à l'ébullition une pâte de plâtre à mouler en train de se prendre. Les bulles de vapeur, en venant crever à la surface, déterminent des accidents qui ressemblent singulièrement pour la forme aux appareils volcaniques (fig. 40). En recouvrant le plâtre d'une couche de sable, on détermine des éruptions et des épanche-

1. *Mémoires de l'Académie des sciences de Bologne*, 1890.

ments de plâtre qui offrent des ressemblances singulières avec les coulées de laves volcaniques (fig. 41).

C'est comme appendice à cet ensemble de recherches, qu'il faut mentionner l'appareil classique qui

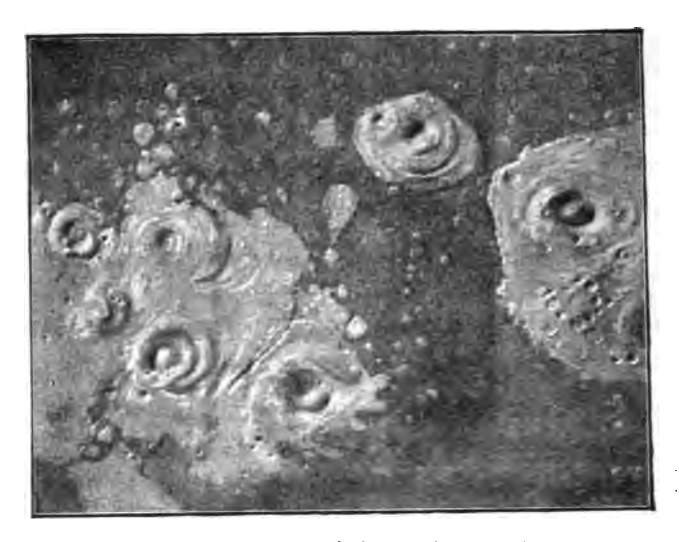


Fig. 41. — Imitation expérimentale des épanchements volcaniques.

donne une imitation des geysers et les expériences de M. Stanislas Meunier sur l'épanchement des *laccolithes* à l'aide de cire fondue ou d'alliage fusible, injectée entre des feuilles superposées de plâtre ayant encore une certaine malléabilité.

Introduction infra-granitique de l'eau.

Mais il reste, après ces résultats obtenus et qui font tous intervenir une énergie qu'on n'explique bien que par la force élastique de la vapeur d'eau infra-granitique, un problème capital à résoudre.

Comment l'eau peut-elle exister dans le laboratoire où la puissance volcanique prend naissance? Est-ce une *eau d'origine*? Cela ne s'expliquerait pas, puisque la température du globe va constamment en s'abaissant et que les conditions passées étaient dès lors moins favorables encore que les présentes pour le maintien de l'eau.

C'est donc de l'eau d'*introduction* récente, et les preuves abondent que le laboratoire profond doit en effet être à chaque instant remis en possession de l'eau que les éruptions lui font perdre. Mais comment concevoir l'introduction?

Une première hypothèse émise par Gay-Lussac fait jouer un rôle à des crevasses sous-marines, mais il est facile de sentir son impossibilité. Si l'on suppose en effet une crevasse aboutissant aux régions très chaudes d'où émane l'énergie volcanique, on devra reconnaître que l'eau n'y saurait pénétrer justement à cause de la pression qui y est engendrée et qui, capable des explosions, capable de rejeter au dehors la lave volcanique si pesante, s'opposera nécessairement à la pénétration de l'eau.

M. Daubrée a décrit à cette occasion des expériences, dont les conclusions n'ont pas été vérifiées, sur la prétendue possibilité d'une infiltration capillaire de l'eau au travers des roches, malgré une forte contre-pression de vapeur.

La solution de la question paraît résulter d'expériences très simples de M. Stanislas Meunier, dont les conséquences nous occuperont de nouveau un peu

plus loin. Elles concernent les pulvérisations consécutives aux fractures du sol ou failles. On superpose deux couches de plâtre à mouler, d'ailleurs mélangé d'une quantité convenable de sable qui le rend un peu friable, et dont l'une, la supérieure par exemple, a été colorée en rouge par le mélange préalable d'un peu de colcothar. Quand la consistance est favorable, on détermine, par pression ou par torsion, des cassures au travers de la masse avec écartement des deux bords de la solution de continuité. On coule alors dans la crevasse béante, du plâtre légèrement coloré en vert par le mélange d'un peu d'oxyde de chrome. Après consolidation complète, on mène un trait de scie au travers de la masse, perpendiculairement au plan de la cassure, et on a alors la reproduction d'un dyke vert qui traverse un ensemble de deux terrains, dont l'inférieur est blanc pendant que le supérieur est rouge. Or, on constate dans la masse intercalée, à la hauteur du terrain blanc, des blocs rouges qui sont tombés par égrènement au moment de l'ouverture de la cassure.

C'est, en somme, la reproduction artificielle des brèches de filons de roches, si fréquentes en maintes localités. Mais l'expérience se prête à une interprétation immédiatement applicable au sujet que nous avons en vue.

Imaginons en effet que nos deux couches horizontales de plâtre représentent toute l'épaisseur de la croûte terrestre, subdivisée en deux zones concentriques, dont la plus superficielle (rouge) est formée

par les roches, qui par infiltration centripète se sont pourvues de leur eau d'imbibition ou de carrière, tandis que la plus profonde (blanche) est faite de roches qui sont encore trop chaudes pour avoir cessé d'être anhydres. Ceci posé, on voit que le mécanisme mis en œuvre dans l'expérience fait toucher du doigt le procédé par lequel des fragments de roches pourvues d'eau pourront pénétrer dans des zones trop chaudes pour que l'eau y soit tolérée.

L'arrivée de cette eau dans un semblable milieu devra déterminer des effets variés dont nous allons mentionner les principaux. Mais auparavant il convient de préciser le fait lui-même, pour écarter des objections qui ont été parfois opposées à l'auteur.

Tout d'abord, il me faut noter l'étonnement profond que j'ai éprouvé, à l'époque de la première publication du travail sur le sujet qui nous occupe, de voir une des notabilités géologiques les plus considérées de ce temps, et qui s'est spécialisée dans l'étude des phénomènes volcaniques, opposer à l'ensemble de ces considérations une fin de non-recevoir basée sur ceci que la situation relative des objets contenus dans une enceinte close ne saurait faire varier la pression de cette enceinte. Dès lors, les roches hydratées avaient beau tomber dans les régions très chaudes, la pression de l'ensemble restant le même, les explosions volcaniques n'étaient pas expliquées. Cette objection était faite d'un ton sans réplique qui aurait été de mise très évidemment dans le cas d'une assertion démontrée. Or, des expériences qui, pour être involontaires,

n'en sont pas moins incontestables, suffisent à prouver que cet air supérieur n'était en rien justifié par la réalité des choses. Qui n'a présentes à l'esprit en effet les explosions de chaudières à vapeur déterminées simplement par le décollement d'un peu d'incrustation calcaire, dont la suppression met tout à coup en contact l'eau en ébullition et une surface métallique portée au rouge, et dont l'action avait jusque-là été paralysée par l'interposition de la matière pierreuse si peu conductrice pour la chaleur?

Le phénomène naturel, que l'expérience de M. Stanislas Meunier a la prétention de rendre facilement acceptable, ressemble d'autant plus aux cas des chaudières, que souvent sans doute les crevasses efficaces ouvertes à partir d'en bas ne viennent pas s'ouvrir jusqu'à la surface du sol, et c'est là un point important.

Les résultats de la contraction horizontale de la croûte terrestre, pour un même refroidissement dans toute son épaisseur, doivent en effet avoir une énergie en rapport avec la distance du centre; il s'ensuit nécessairement une résultante verticale dirigée de haut en bas et qui s'ajoute à la pesanteur et au vide relatif interne, pour appeler dans les profondeurs les matériaux comprimés. Il peut, dans ces conditions, se constituer comme des coins limités par des cassures voisines et à biseau supérieur, qui peuvent glisser vers le bas comme les « noyaux de cerise » dont M. Schardt a introduit la considération dans les phénomènes de géodynamique. Il suffit d'un déplacement peu considérable pour que

la portion pourvue d'eau d'un de ces coins atteigne la zone de déshydratation.

Ajoutons d'ailleurs que les égrènements de matière, indiqués tout d'abord, peuvent être remplacés dans leurs effets par des *chevauchements* à longues distances, du genre de ceux qui nous occuperont à propos d'orogénie, et qui sont très aptes à mettre en contact des masses profondes brûlantes avec des masses, relativement superficielles, imprégnées de leur eau de carrière.

Une fois l'eau introduite dans le milieu très chaud où le mécanisme précédent la fait parvenir, il lui arrivera, suivant les cas, des destinées différentes. Les circonstances les plus simples amèneront son absorption par *occlusion* dans la substance de roches voisines maintenues en fusion, et c'est ainsi que se constituera cette dissolution de l'eau dans la lave fondue, dont les propriétés foisonnantes expliquent l'ascension, dans les failles béantes, des filons de roches éruptives de tous les âges, aussi bien que celle des laves des volcans modernes.

Cette solution, si comparable, malgré sa nature spéciale, à du vin de Champagne ou à de l'eau gazeuse, demeurera inerte tant que le réservoir qui la contient restera fermé et comparable à une bouteille bouchée. Mais elle se détendra, moussera et débordera, si l'ouverture d'une communication avec l'extérieur, siège des basses pressions, réalise une condition tout à fait analogue à celle de la suppression du bouchon dans le cas de la bouteille.

Parfois aussi, par suite de fuites moins soudaines, de l'eau pourra aussi se dégager peu à peu, et c'est à son passage qu'il faudra, d'après ce que nous avons vu plus haut, attribuer tout le développement des phénomènes filoniens.

On remarquera qu'une des conséquences remarquables de cette étude expérimentale, est de modifier beaucoup les idées en cours, sur la prétendue nécessité du voisinage de la mer quant au développement des phénomènes volcaniques. La méprise vient de ce que les fractures du sol, nécessaires à l'introduction profonde des roches hydratées, se développent nécessairement de préférence sur les lignes littorales (mais non exclusivement). Ces fractures d'ailleurs peuvent se fixer avec le temps et ne plus jouer le rôle volcanique; et ce qui explique que tant de rivages ne soient point des lignes de volcans, c'est que des rivages peuvent se constituer par des dénivellations à grandes courbures et sans fractures profondes.

Répétons pour les volcans ce que nous disions pour les dunes et pour les deltas, que, contrairement à l'opinion d'Élie de Beaumont et de ses élèves, ces accidents ne constituent aucunement un trait caractéristique de l'époque actuellle. On reconnaît maintenant, à la suite de M. A. Geikie et conformément aux vues générales de l'Actualisme, que toutes les époques géologiques ont eu leurs volcans, dont les caractères extérieurs se sont seulement modifiés en conséquence du jeu des phénomènes de dénudation.

CHAPITRE III

Les tremblements de terre.

Si les expériences nous procurent un certain nombre de renseignements sur l'allure du phénomène volcanique, elles ne sont pas moins efficaces relativement aux tremblements de terre qui y sont liés souvent d'une manière si intime.

La sismologie est un chapitre qui à diverses reprises, et par plusieurs personnes, a été abordé expérimentalement.

On peut même commencer par mentionner des expériences accidentelles du genre de celles que nous signalions dans notre Introduction. Du nombre sont des explosions dont les effets imitent ceux des tremblements de terre. A Paris, en septembre 1794, l'explosion du dépôt des poudres de Grenelle laissa des traces signalées par Arago en 1839 à l'hôtel Soubise qu'on était en train de réparer, tels que des fûts de colonne ayant tourné sur eux-mêmes et présentant les analogies les plus remarquables avec les effets classiques des tremblements de terre. Ces faits tirent

un intérêt très direct de la connaissance exacte du point de départ de l'impulsion et de l'énergie dynamique dépensée. A Paris, en mai 1871, l'explosion de la poudrière du Luxembourg procura aussi des faits intéressants que M. Stanislas Meunier a observés immédiatement. Du nombre sont des crevasses ouvertes et refermées dans les murs avec tant de soudaineté que des vêtements, suspendus devant ces murs et poussés par le courant d'air, s'y encastrèrent et ne purent en être retirés. C'est la reproduction d'un fait qui fréquemment accompagne les secousses sismiques.

Parmi les expériences rationnelles on peut mentionner celle de M. Fouqué sur la propagation des ondes sismiques dans le sol. C'est au Creusot qu'il a étudié ainsi de vrais tremblements de terre artificiels, déterminés par la chute du gros marteau-pilon.

Mais il convient dans ce chapitre de faire une place à part à des expériences que M. Stanislas Meunier a réalisées en vue de contrôler une théorie sismique qui s'appuie sur des faits déjà indiqués tout à l'heure au sujet du mécanisme de l'introduction de l'eau dans les profondeurs par la chute de matériaux hydratés. A cet égard, il faut remarquer que l'occlusion de la vapeur dans les roches fondues, où elle se dissout en leur communiquant des propriétés foisonnantes, n'est pas le seul cas qui se puisse présenter.

La chute peut aussi avoir lieu dans des régions plus ouvertes, moins comprimées, où le dégagement subit de l'eau en vapeur ou sous la forme de ses éléments dissociés, affecte la forme d'une véritable explosion.

Dans ce cas, à chaque chute doit correspondre un choc et il est facile de montrer comment les principales conditions sismiques sont expliquées de cette façon.

Par exemple, M. Stanislas Meunier a fait remarquer[1] comment une communication de M. Arturo Issel sur les tremblements de terre éprouvés en 1893 dans l'île de Zante, renferme une série de détails qui confirment la théorie sismique qui vient d'être indiquée. Dans cette manière de voir, la puissance mécanique, subitement développée, dans les profondeurs de la croûte terrestre, résulte de la volatilisation brusque, et peut-être de la dissociation, d'eau précipitée verticalement dans les régions très chaudes, sous la forme de l'humidité qui imprègne des blocs rocheux s'écroulant sur les parois des grandes failles. Les conditions géologiques des pays à tremblements de terre, toujours situés en des zones disloquées, s'accommodent en effet de cette hypothèse, qui explique aussi la soudaineté des chocs et des secousses, l'inégale énergie des impulsions successives et les intervalles inégaux qui les séparent, leur multiplicité, qui peut être considérable dans le même lieu en un temps fort court, et le déplacement progressif du centre d'ébranlement, qui peut cheminer le long des lignes de failles, comme si des tiraillements s'y propageaient avec leur cortège de désagrégations et de crevassements.

M. Stanislas Meunier ajoute que le mode bien connu

1. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, séance du 4 juin 1894.

d'ouverture des failles et la présence constante entre leurs lèvres de fragments rocheux que la pesanteur y fait tomber comme on l'a vu p. 261, rendent inévitable la réalisation dans les profondeurs du mécanisme qui vient d'être rappelé. Or, en lisant les descriptions de M. Issel, on y retrouve tous les caractères qui doivent nécessairement accompagner, si elle est réelle, la précipitation de blocs rocheux dans le vide des failles et l'explosion subite de l'eau dont ils étaient imprégnés. C'est ainsi que, suivant l'observateur italien, les secousses normales semblaient toutes produites par *une cause commune* agissant au-dessous d'un point situé en mer, au sud-ouest de l'île, à quelques kilomètres du cap Kerri. C'est ainsi que les détonations, semblables à des coups de canon et ressemblant quelquefois aussi « *au fracas* des bulles de gaz qui éclatent dans les cratères volcaniques », étaient très nombreuses avant et après les grandes secousses. C'est ainsi, enfin et surtout, que les chocs ressemblaient à l'effet produit *par la chute d'un corps lourd sur un sol un peu élastique et mou*. L'un de ces chocs a été signalé le 31 janvier, *un peu avant la première secousse.*

On reconnaîtra d'ailleurs qu'il n'y a aucunement besoin de supposer des vastes cavités souterraines et que le vide des failles est assez large pour que le phénomène s'y développe. On trouve, en plein granit et en plein gneiss, des brèches de failles qui suffisent à montrer la réalité des conditions qui viennent d'être supposées.

Mais ce qu'il importait de faire, c'était de rendre sen-

sibles, par la méthode expérimentale, les explosions de matériaux hydratés et leur efficacité pour déterminer

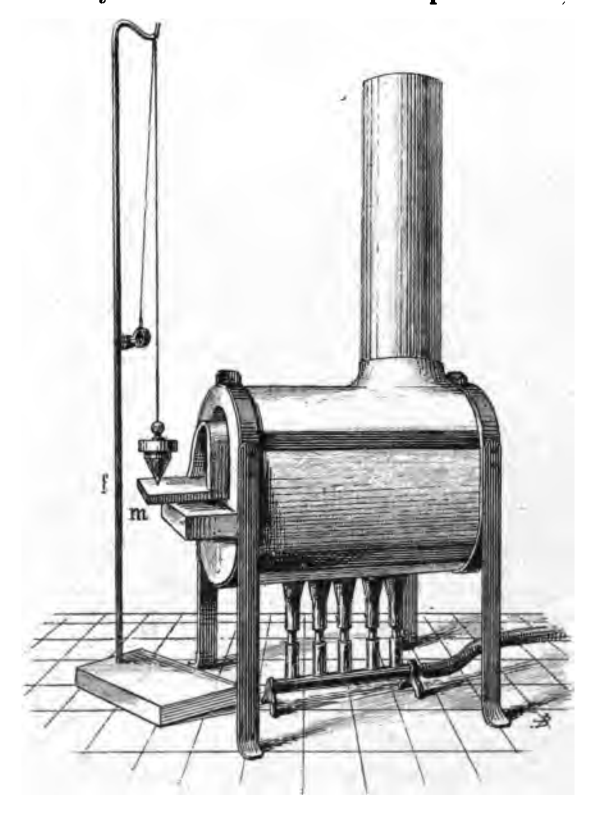


Fig. 42. — Appareil propre à l'imitation artificielle des tremblements de terre.

des secousses analogues, toutes proportions gardées, aux convulsions sismiques.

C'est ce que M. Stanislas Meunier a fait avec le petit appareil de la figure 42. C'est un petit four à moufle comme on en emploie pour les calcinations, mais dont la sole se prolonge en avant sous forme

d'une tablette horizontale *m*. On y dépose une mince couche de sable fin et un fil à plomb très lourd *f* vient y mettre la pointe de sa masse. Quand le moufle est chauffé au rouge, on y introduit, à l'aide d'une pince, des fragments d'argile ne renfermant plus que quelques centièmes d'eau, et l'on constate au bout d'un instant, une et quelquefois plusieurs explosions. A chacune des secousses le fil à plomb, constituant un vrai sismographe, inscrit une courbe dans le sable, et la ressemblance avec le phénomène naturel ne peut manquer de frapper l'esprit par son exactitude.

L'explosion des blocs d'argile, encore un peu humide quoique paraissant sèche, quand on les met dans l'enceinte chauffée au rouge, est tout à fait remarquable par son intensité et justifie pleinement la supposition émise tout à l'heure. L'impulsion brusque qu'elle produit et la facilité avec laquelle elle peut se répéter à chaque bloc introduit, reproduisent aussi les particularités les plus saillantes du phénomène sismique.

CHAPITRE IV

La production des montagnes.

Les plis.

La méthode expérimentale s'est appliquée avec beaucoup de succès à l'étude des déformations de la croûte terrestre et, dans cette direction, des résultats très précis ont été dès maintenant obtenus.

Il est clair que l'appel centripète de la croûte mince par le noyau fluide en voie de contraction continue, développe nécessairement une composante horizontale qui doit déterminer des refoulements.

Le premier effet constatable est la production des *plis*.

James Hall, en 1812, insiste déjà sur le sens horizontal des actions mécaniques, et il admet soit une force venant heurter un obstacle fixe, soit deux forces antagonistes : sur des pièces de drap, de flanelle et d'autres étoffes, une planche (une porte) est couchée et chargée de poids; des pièces de bois transversales disposées

sous la porte sont refoulées à coups de maillet. Les extrémités des feuilles d'étoffe se rapprochent. La lourde porte est progressivement soulevée et les couches sont plissées comme dans la nature. Le célèbre auteur signale spécialement la ressemblance de ce résultat avec l'allure des couches du killas près de Fast Castle.

Il composa ensuite une machine à vis propre à répéter l'expérience sur l'argile, et c'était, dès le début, imaginer le procédé qui a été le plus employé dans la suite.

Henry Cadell en 1888 entretint la Société royale d'Édimbourg d'expériences sur le *Mountain building*, c'est-à-dire sur la construction des montagnes, et il employa comme Hall une solide caisse en bois dans laquelle la pression était appliquée de même à l'aide d'une vis.

Dans un volumineux mémoire qui vient d'être publié aux États-Unis, M. Bailey Willis décrit des expériences, qui se signalent surtout par leurs grandes dimensions, et qui sont en somme le développement de celles de Cadell[1]. Sans entrer dans leur détail, il faut constater que bien des traits de la structure des montagnes y sont éclairés. Il s'agit surtout des plis, mais on peut remarquer tout de suite, pour y revenir tout à l'heure, que ces nombreuses planches ne donnent que des *profils*, ce qui prouve bien que la

1. *The Mechanics of appalachian structure*, inséré pages 217 à 291 du Thirteenth Annual Report of the United states geological Survey, 1891-1892. Washington, 1893 (avec 96 planches).

conjugaison des cassures n'a pas préoccupé l'auteur. Or c'est un sujet de très haute importance.

M. Stanislas Meunier a étudié ce mode opératoire inauguré par Hall, et, sans lui attribuer une portée qu'on a parfois exagérée, il a produit à son aide des spécimens qui font maintenant partie de la collection

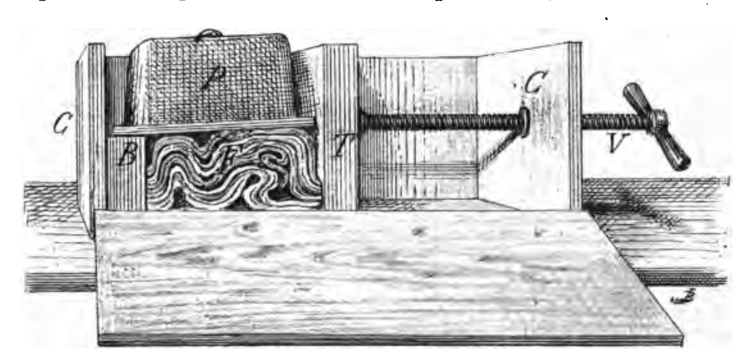


Fig. 43. — Appareil propre à l'étude expérimentale des plis.

de Géologie expérimentale du Muséum. La fig. 43 montre comment est construit l'appareil. C'est une caisse C en bois, sans couvercle et dont la paroi antérieure est à charnière sur le fond et peut se rabattre horizontalement. Un des petits côtés laisse passer une solide vis V, dont le bout est encastré dans une grosse pièce de bois T, qui peut avancer dans toute la longueur de la boîte. Un buttoir B étant disposé contre la paroi opposée à celle qui tient la vis, on étale sur le fond de la caisse des feuilles de papier F de dimension convenable et qui représentent les couches du sol. Après avoir surchargé ces feuilles avec un poids P, soutenu par une planchette, on fait tourner la vis et

on constate que le papier s'infléchit de façon à imiter dans ses contournements les plis observés dans l'épaisseur de la croûte terrestre.

La fig. 44 représente, entre beaucoup d'autres, l'effet obtenu avec une certaine disposition des feuilles : on voit que malgré l'uniformité de la pression

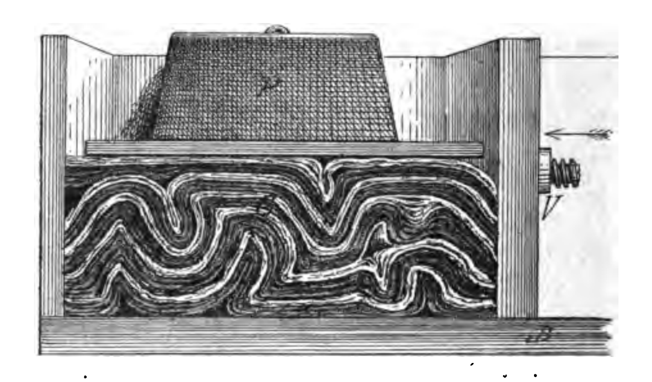


Fig. 44. — Plis obtenus avec l'appareil précédent.
Cas de l'uniformité de la pression verticale dans toute la longueur de l'appareil.

les plis ne sont pas identiques dans toute la longueur. Il y a même vers la droite un décollement de feuillets qui ressemble à des accidents fréquents dans les Alpes et dans d'autres chaînes. Dans la fig. 45 on a un exemple de résultats plus compliqués et on en a obtenu d'autres qui rappellent à certains égards ceux qu'on observe dans la constitution de la Dent du Midi en Valais : la pression développée par le poids s'y étant exercée obliquement, de façon que d'un côté le soulèvement s'est fait bien plus considérable que de l'autre.

Nous ne pouvons entrer dans le détail de ces expériences, mais ce qui précède suffit à montrer que la mé-

thode est susceptible de beaucoup de développements.

En 1878, Alphonse Favre a fait intervenir comme

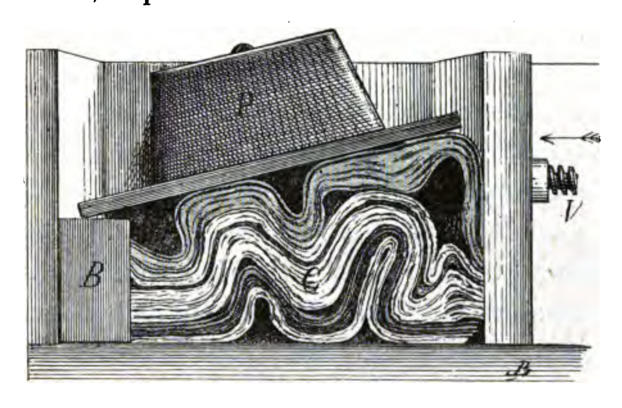


Fig. 45. — Plis obtenus à l'aide de l'appareil de la fig. 43.
Cas d'une pression verticale inégalement distribuée.

générateur des plis, et à la place de la vis de Hall, le caoutchouc qui se rétracte. C'est une idée très heu-

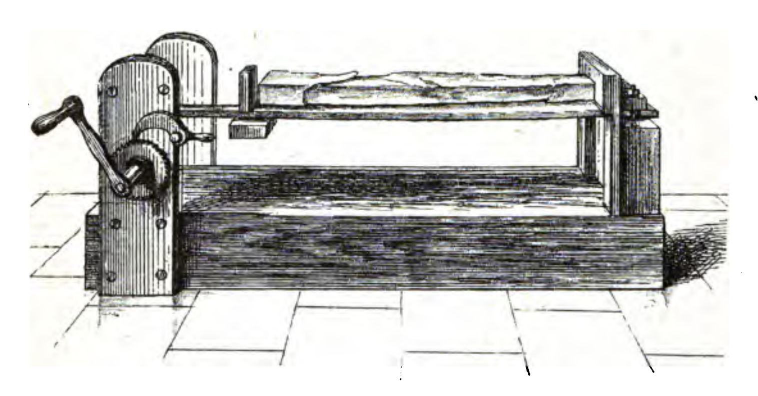


Fig. 46. — Appareil propre à la production des plis par la contraction du caoutchouc distendu.

reuse par ses connexions avec la réalité des choses. Son appareil est représenté par la fig. 46 où l'on voit

comment, sur un châssis suffisamment solide, une épaisse feuille de caoutchouc horizontale peut être plus ou moins étendue, au moyen d'une manivelle. Si, après avoir étalé de l'argile sur le caoutchouc, on laisse celui-ci reprendre doucement ses dimensions primitives, on voit l'argile se plisser et affecter en bien des cas des allures comparables à celles des roches constitutives du sol dans les pays tourmentés.

L'auteur a obtenu des plis synclinaux et des plis anticlinaux, mais il s'occupa très peu des cassures; il constata les failles inverses, mais n'étudia pas les conjugaisons des fractures.

M. le Dr Hans Schardt, en 1884, reprit les travaux de Favre à propos de ses études sur la géologie du Pays d'En-Haut-Vaudois.

Au lieu d'agir sur une simple couche argileuse, il opéra sur des alternances de matériaux différents et spécialement de l'argile et du sable. Il ne s'occupa d'ailleurs presque pas des cassures, mais seulement des *plis*, et imita une série de particularités de la région géologique dont l'étude le préoccupait.

Un fait révélé par les expériences et qui a une importance capitale, c'est que les solides soumis à des actions du genre de celles qui ont plissé les roches, peuvent perdre, au moins en apparence, certains des caractères de la solidité.

Leurs éléments constituants acquièrent les uns vis-à-vis des autres une certaine mobilité et on a pu légitimement, à l'exemple de Tresca, employer l'expression d'écoulement des corps solides.

Ce n'est pas une vraie fluidité, mais c'est un concassement, toujours suivi de raccommodage et qui, à plus d'un égard, rappelle la fausse plasticité de la glace.

M. Stanislas Meunier en a signalé un remarquable exemple dans l'étude expérimentale des *crochons*, c'est-à-dire des portions courbes dans les plis des roches.

L'examen des crochons a un grand intérêt, car on trouve dans leur structure des traces de toutes les actions mécaniques, même les plus légères, qui ont contribué à déterminer la tectonique des régions où on les rencontre. L'auteur les a examinés sur des surfaces polies, et il les a aussi étudiés en lames minces au microscope; enfin il a fait, pour les imiter, des expériences variées avec un appareil particulier.

Tout d'abord, on voit sur la surface polie et sans l'emploi de verre grossissant, que la roche tordue est réduite en feuillets grossièrement parallèles entre eux et dont chacun est infléchi comme l'ensemble. Il en résulte une espèce de schistosité très accusée dans certaines roches, qui est le résultat évident de la torsion.

Les feuillets ne sont d'ailleurs pas indéfiniment continus : ils ne tardent pas, en général, à se finir en biseau et s'associent par chevauchement avec des feuillets voisins. On voit se dessiner, au travers des échantillons, des systèmes de cassures, que rendent plus évidentes encore les substances, quartz ou calcite, suivant les cas, qui s'y sont concrétionnées, et on constate alors que ces solutions de continuité se répartis-

sent en plusieurs groupes. Dans cet examen rapide, nous en mentionnons seulement trois.

Les plus fréquentes, quand on regarde une section perpendiculaire à la génératrice du crochon, constituent comme une espèce d'éventail incomplet dont le centre coïnciderait avec le centre de la torsion et qui se détache en blanc sur le fond gris de la roche. Ces cassures se multiplient quand on fait varier l'inclinaison de la surface polie par rapport à la lumière incidente ; on en voit alors de très fines, de très longues, qui comblent bien des lacunes de l'ensemble tout d'abord visible. Il est clair que ces cassures, maintenant remplies par des minéraux de ségrégation, témoignent de l'extensibilité très imparfaite de la pâte rocheuse soumise à la traction sur la périphérie des plis. On en est d'autant plus sûr que leur largeur va d'ordinaire en augmentant du centre vers l'extérieur, au travers de certains feuillets, et qu'on voit des cassures rectilignes, appartenant toujours au même type, manifester d'une façon spéciale l'étirement dont il s'agit. Malgré la forme cylindrique prise par le feuillet considéré, ces fissures rappellent exactement les cassures parallèles des schistes à bélemnites tronçonnés et étirés, depuis si longtemps observées par exemple dans les schistes liasiques du mont Lachat, en Haute-Savoie.

Une deuxième catégorie de fissures, en gros perpendiculaires au premier système, se signale selon la surface de contact des feuillets superposés. Certaines d'entre elles sont de largeur relativement con-

sidérable et par conséquent facilement visibles. Elles peuvent être fort longues et il leur arrive de s'associer à des cassures du premier type, de façon qu'elles passent d'une face à l'autre d'un même feuillet. Ces cassures de décollement se rattachent à la loupe et même au microscope, à des petites fissures qui passent aux joints de schistosité. Quand on examine une surface, on cons-

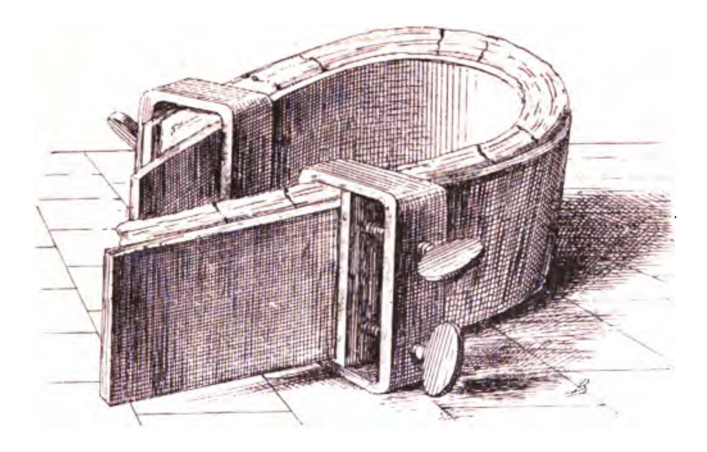


Fig. 47. — Appareil propre à l'étude expérimentale des crochons de roches.

tate qu'elle est polie et striée dans le plan des feuillets, et, quand on attaque un crochon à coups de marteau, ces surfaces déterminent certaines des cassures selon lesquelles se séparent les échantillons. On peut supposer que, liées à la production de la schistosité, elles se rattachent comme à leur cause génératrice aux glissements qui se sont produits dans la masse rocheuse hétérogène lors de la torsion.

Enfin, quelques grandes cassures traversent les crochons dans des directions qui ne sont pas directe-

ment liées à celles des contournements. Il paraît légitime de les attribuer, suivant les cas, soit à des actions mécaniques développées après la constitution des crochons par les compressions subies par le terrain, soit à des contractions internes et spécialement à des effets de la dessiccation des roches.

Les expériences que M. Stanislas Meunier a réalisées pour compléter l'étude des crochons ont été tentées avec l'appareil très simple de la figure 47. Il se compose de deux lames planes et rectangulaires de plomb, rattachées ensemble par un système d'armature qui ne les empêche pas de glisser l'une par rapport à l'autre. Entre ces deux lames, on dispose une plaque plus ou moins épaisse homogène ou hétérogène et de consistance variable d'un cas à l'autre; puis on soumet le tout à une torsion dont la figure indique le résultat. Alors les diverses pâtes employées se comportent de façons diverses suivant leur plasticité ou leur compacité, — suivant aussi leur épaisseur et, en opérant convenablement, on reproduit tous les accidents des crochons naturels. Avec du plâtre, on développe très aisément les cassures en éventail; avec du plâtre associé à la cire dans des proportions variées, on voit se faire la schistosité avec les cassures parallèles aux surfaces cylindroïdes.

En poursuivant les recherches, on détermine la production de tant de détails analogues à ceux des crochons naturels qu'il en résulte sur la genèse de ceux-ci une lumière directe.

Il faut remarquer, en effet, qu'à la vue des grands

contournements de roches, comme on en rencontre à chaque pas dans les montagnes, on est fort perplexe de savoir comment des strates, déposées d'abord avec une forme plane et composées de substances aussi peu plastiques que des calcaires ou des grès, ont pu changer si complètement de forme, sans perdre leurs mutuels rapports de situation.

L'allure générale du phénomène comparée à celle des expériences, apprend que la plasticité n'intervient guère et qu'elle est même complètement inutile. La confirmation de cette manière de voir, qui d'ailleurs a déjà été émise, est aussi complète que possible et, pour citer le cas extrême, on peut réaliser artificiellement la torsion d'une mince feuille de marbre. Celle-ci étant prise entre les plombs, on procède à la torsion et on obtient des cassures le plus souvent dirigées parallèlement aux génératrices. On coule alors entre les fragments séparés, du ciment très solide préparé à l'avance, puis quand la prise est tout à fait complète après un jour ou deux, on accentue la courbure déjà commencée. De nouvelles cassures se produisent alors qu'on recolle de la même manière, et on peut continuer ainsi pendant plus ou moins longtemps. A la fin, on a un vrai crochon parfaitement solide, où la feuille de marbre est parfaitement tordue sans avoir jamais eu la moindre plasticité, et ce produit manifeste l'allure des crochons naturels d'une manière intéressante.

On ne peut nier en effet que la matière cristalline, calcaire ou quartzeuze, qui incruste les cassures, n'ait

joué dans la nature le rôle exact de notre ciment. Elle a rendu à chaque instant à la roche la forme relative à la torsion qu'elle avait subie.

Malgré les différences qui sautent aux yeux et sur lesquelles il n'y a pas à insister, on peut ajouter en terminant que cette fausse plasticité des roches présente de grandes analogies avec la fausse plasticité de la glace, qui nous a occupés précédemment et grâce à laquelle les glaciers s'écoulent dans les vallées qui les contiennent et en épousent constamment les formes. Au lieu du phénomène de regel étudié par Tyndall, nous avons ici le phénomène de ségrégation qui vient combler les fissures et cimenter les fragments. Le mécanisme est différent, mais le résultat est le même.

La schistosité.

C'est comme une accentuation des faits précédents qu'il faut signaler l'acquisition, par les solides comprimés et admis à s'écouler, de la structure schisteuse.

L'abondance et la diversité des roches schisteuses sont prodigieuses et l'on a fait des hypothèses nombreuses pour expliquer leur structure si remarquable. C'est à la méthode expérimentale qu'on doit de posséder enfin une théorie certaine de la schistosité, et la production artificielle du feuilleté par des procédés exclusivement mécaniques a permis de renoncer sans retour à toutes les autres suppositions telles, pour citer la plus étrange, que celle de Fox, qui prétendait imiter

expérimentalement la schistosité par l'effet de l'électricité[1].

Dans cette voie, le travail initial est dû à Tyndall; M. Daubrée a repris le sujet, et les expériences de ces deux auteurs ont été relatives surtout à la production des feuillets, par écoulement perpendiculaire au sens de la pression.

M. Stanislas Meunier a réalisé par glissement la production d'une schistosité parallèle à la pression. Il a employé pour cela l'appareil déjà décrit (fig. 46) et sur lequel nous reviendrons, où la force utilisée est engendrée par la contraction d'une feuille de caoutchouc préalablement étirée. Une couche de trois centimètres de plâtre de consistance convenable étant soumise à ce genre d'effort, on reconnaît que sa région inférieure, c'est-à-dire voisine de la lame élastique, se feuillette parallèlement à celle-ci et l'analogie de la disposition des feuillets produits, avec ceux qu'on voit sur les marges des massifs granitiques, est extrêmement remarquable.

C'est à ce sujet qu'il y a lieu de mentionner les expériences de M. Daubrée sur la déformation par étirement des fossiles contenus dans les roches schisteuses; elles confirment ce que les précédentes ont enseigné, sur l'allure exclusivement mécanique du phénomène.

1. *Memoirs of the Royal Cornwall Polytechnic Society*, 1837.

Les géoclases.

Quand les efforts exercés sur les roches sont suffisants, le refoulement des couches amène des fractures, et c'est ainsi que l'étude expérimentale des géoclases peut être fructueusement abordée. Il est évident en effet que le mode opératoire propre à leur production donnera des cassures, si l'intensité mécanique dépensée est assez considérable.

Tout d'abord, il faut remarquer qu'on a quelquefois exagéré beaucoup le rôle des failles dans la forme du relief du sol, et par exemple M. Daubrée a confondu, avec des cassures, de simples résultats de l'érosion fluviaire dont nous avons parlé en leur lieu, et cette remarque s'applique spécialement à la distribution des vallées dans le nord de la France et dans d'autres pays analogues.

D'un autre côté, il faut remarquer que plusieurs auteurs, qui ont étudié la production artificielle des plis, ne se sont pas préoccupés des cassures, qui cependant sont liées si intimement avec eux. James Hall, opérant sur des feuilles de drap ou de flanelle, ne pouvait évidemment en obtenir, mais Alphonse Favre, M. Schardt, M. Bailey Willis, tout en notant la production de failles, n'y ont attaché qu'une attention légère et n'ont rien observé sur les relations mutuelles d'orientation des cassures produites.

M. Daubrée a indiqué la perpendicularité relative de cassures obtenues par compression de blocs de

cire; mais les nombreux détails qu'il a fournis sur les cassures obtenues par la torsion de lames de glaces ne paraissent susceptibles d'aucune application à l'interprétation des faits naturels; les éventails que font entre elles ces cassures, n'ayant été observées nulle part.

M. Stanislas Meunier a fait beaucoup d'essais sur la production des cassures conjuguées dans des masses non rétractiles superposées à des feuilles de caoutchouc. Avec de la stéarine mince, il a vu s'ouvrir des cassures dans trois directions, — dont deux, rectangulaires entre elles, sont dues à la rétraction de caoutchouc, tandis que l'autre, longitudinale, résulte de l'élargissement de la bande élastique et par conséquent de son extension transversale. Ces dispositions reproduisent celles qui ont été notées dans bien des champs de filons et par exemple à Vialas (Lozère).

Mais un ensemble bien plus fructueux de recherches a été réalisé avec des substances non rétractiles relativement épaisses. L'appareil employé est celui d'Alphonse Favre, représenté figure 46, page 281, et présentant, fixés à la lame de caoutchouc, deux butoirs verticaux en bois. Entre ces deux butoirs écartés convenablement par l'extension du caoutchouc, on met verticalement et le long des bords de la bande élastique, deux petites planchettes qui complètent une vraie auge dont le fond est constitué par le caoutchouc. On y verse du plâtre à mouler délayé dans la quantité convenable d'eau et on attend que les progrès de la prise lui aient donné une certaine consis-

tance. On enlève alors les parois latérales de l'auge et on laisse le caoutchouc revenir lentement sur lui-même. Le plâtre, n'étant pas contractile, subit les effets de la compression entre les deux butoirs, qui se rapprochent l'un de l'autre, et c'est alors que les cassures de divers ordres se développent.

Pour bien comprendre le phénomène, il faut avoir présente à l'esprit la différence relative de situation des deux butoirs. L'un d'eux, fixé au point même où le caoutchouc est encastré dans le châssis de l'appareil, reste immuable à sa place : nous l'appellerons le *pôle* pour des raisons qui s'éclairciront tout à l'heure. Le deuxième butoir, au contraire, pris sur le caoutchouc vers le milieu de sa longueur, s'éloigne progressivement du premier au fur et à mesure de l'extension de la bande sous l'influence de la manivelle.

De même, il importe de bien se rappeler que pendant la rétraction, les différentes parties du caoutchouc ne sont pas dans les mêmes conditions et cèdent à un effort qui est d'autant plus énergique qu'il s'agit d'une zone plus éloignée du pôle. A cet égard l'auteur, non content de la théorie, a fait des mesures directes qui ont d'ailleurs absolument confirmé celle-ci. Des centimètres étant tracés le long du caoutchouc au repos, on constate qu'au moment où les 5 premiers centimètres à partir du pôle ont pris 6 c. 7 de longueur totale, les 10 premiers mesurent 13 c. 4, les 15 premiers 20, et les 20 premiers 26 c. 6. C'est donc bien conforme à la loi, et les conséquences en seront nombreuses.

Mais ce n'est pas tout et on constate qu'en même temps que la bande s'allonge elle se rétrécit : ce qui veut dire qu'en se raccourcissant, en revenant sur elle-même, elle s'élargira; d'où il résultera des efforts spéciaux sur le plâtre et qui se combineront avec les autres. A cet égard des mesures directes ont montré, par l'examen de carrés de 1 centimètre de côté dessinés sur la bande, que quand l'extension amène 1 centimètre *longitudinal* à 1 c. 2, il rapetisse 1 centimètre *transversal* à 0 c. 95. Quand le premier devient 1 c. 3, l'autre est 0 c. 91; pour 1 c. 4, il devient 0,90; pour 1 c. 5, 0 c. 86, etc.

Ceci posé, voici, comme exemple, le détail d'une expérience : le caoutchouc ayant un centimètre d'épaisseur, la distance initiale entre les deux butoirs est de 22 centimètres. On produit l'extension de façon à amener cette distance à 0 m. 33. On y coule du plâtre sur 3 centimètres d'épaisseur, et après la prise poussée jusqu'à persistance de l'empreinte du doigt, on laisse revenir doucement à 0 m. 29.

Avec une plaque de plâtre de 3 centimètres d'épaisseur uniforme et de consistance convenable, les résultats ont été fort nombreux et parfois très remarquables, et l'on peut à ce sujet voir la figure 48 où, comme dans les suivantes, la lettre P indique le *pôle de pression* défini il n'y a qu'un instant. Tout d'abord on voit persister le réseau des cassures avec ses caractères essentiels, mais atténué dans sa précision, de façon à se rapprocher beaucoup des réseaux naturels qui sont très loin de présenter une régularité géomé-

trique. Ce réseau est comme ordonné tout entier par rapport au *horst* ou buttoir triangulaire qui se manifeste tout d'abord au bout polaire P.



Fig. 48. — Réseau de fractures produites sur une plaque rectangulaire de plâtre de 3 centimètres d'épaisseur, par la rétraction d'une lame de caoutchouc sur laquelle on l'avait coulé. A gauche, face supérieure ; à droite, face latérale.

En second lieu on voit se faire *en même temps* des cassures qui se rejettent les unes les autres ; circonstance d'où il y aura à tirer des conséquences pour la chronologie des filons dont l'âge relatif n'est pas toujours aussi facile à déterminer qu'on le croit quelquefois.

Il faut du reste remarquer que, dans ces réseaux, il est très ordinaire qu'une direction soit prédominante sur l'autre, au double point de vue de la grandeur des cassures et de leur nombre.

Il faut noter l'existence ordinaire de petites fissures faisant comme un cortège à des cassures plus importantes auxquelles elles sont d'ailleurs parallèles. C'est une imitation d'un fait très fréquent dans l'écorce terrestre.

On est bien frappé de l'extrême abondance des failles dites *inverses*, c'est-à-dire dans lesquelles le mur a glissé sur le toit. Elles résultent d'un effort

vertical, inverse de la pesanteur, et qui dérive des pressions horizontales. On a à chaque pas à reconnaître la grande fréquence de ces failles dans la constitution des montagnes, qu'elles éclairent, grâce aux expériences, d'un jour très vif. Toutes les grandes failles primitives sont nécessairement inverses et résultent d'efforts horizontaux; nous y reviendrons à propos de l'orogénie expérimentale.



Fig. 49. — Réseau de fractures produites par le procédé précédent sur des plaques de plâtre de 3 centimètres d'épaisseur, mais triangulaires. A gauche, la base du triangle est dans la région polaire; à droite, c'est le sommet. Dans les deux cas, on voit se faire au pôle le buttoir triangulaire et s'isoler des blocs amygdaloïdes.

On a souvent, dans le cours des expériences, l'occasion d'assister à la propagation très progressive des cassures et des plis; phénomène qui ne peut pas manquer dans les déformations terrestres et dont la considération est extrêmement fructueuse au point de vue de la géodynamique.

Préoccupé de jeter du jour sur le plus grand nombre de traits constatés dans l'étude des chaînes de montagnes, M. Stanislas Meunier n'a pas tardé à passer des plaques de plâtre uniformes dans toutes leurs parties à des plaques présentant des particularités

caractéristiques. Nous allons en mentionner quelques-unes.

Tout d'abord (fig. 49), il a pris des plaques qui tout en ayant partout 3 centimètres d'épaisseur uniforme avaient une forme triangulaire au lieu de la forme rectangulaire du début. A gauche de la figure on voit un spécimen obtenu en plaçant la base du triangle au pôle de pression P et à droite un second échantillon obtenu dans la condition inverse, c'est-à-dire avec le sommet du triangle au pôle. On voit ici persister à ce point P le horst qui déjà apparaissait nettement dans la figure 48. Un des systèmes de cassure prédomine encore plus sur l'autre que précédemment, et on constate qu'il s'accompagne de l'isolement de blocs amygdaloïdes dont la ressemblance est frappante avec des circonstances signalées dans ces derniers temps à propos de la structure du Mont-Blanc et d'autres massifs montagneux. Les rejets transversaux considérables qui accompagnent cet isolement sont de nature à faire accepter la conception des chevauchements à longues distances qu'on a exposée à propos de la structure des Alpes et des diverses chaînes.

M. Stanislas Meunier a étudié ensuite l'influence d'une variation d'épaisseur en ses divers points de la plaque de plâtre, et un exemple de cette série est représenté figure 50, où l'épaisseur maxima était près du pôle, ainsi que l'indique la coupe ajoutée à gauche de la figure. Ici, le horst polaire s'est spécialement accentué et les géoclases en chevrons se sont développées à sa suite progressivement dans les régions de

plus en plus minces avec une équidistance remarquable, bien que la lente contraction du caoutchouc ait été parfaitement continue. On remarque une grande



Fig. 50. — Réseau de cassures obtenues par le procédé précédent sur une plaque de plâtre rectangulaire et dont l'épaisseur va en croissant régulièrement vers le pôle de pression ; à gauche, une vue latérale montre la disposition des cassures en profondeur.



Fig. 51. — Réseau de cassures obtenues par le procédé précédent sur une plaque de plâtre rectangulaire dont l'épaisseur croissait régulièrement de gauche à droite. En bas, une vue de la face transversale.

prédominance du système N.-O.-S.-E., bien que l'autre soit bien accusé en plusieurs régions.

Dans la figure 51, on a choisi une autre variante relative au cas où la plaque rectangulaire est plus épaisse sur l'un de ses grands côtés que sur l'autre, l'effet de cette modification n'est pas très considérable.

L'auteur a examiné les cas où la plaque présente

soit une dépression, soit au contraire un relief dans sa région moyenne et selon toute sa longueur; mais nous insisterons de préférence sur ceux qui sont



Fig. 52. — Réseau de cassures obtenues par le procédé précédent sur une plaque de plâtre rectangulaire dont l'épaisseur va en diminuant des deux extrémités vers la région médiane. A droite, vue d'une face latérale montrant la disposition anticlinale des cassures produites.



Fig. 53. — Réseau de cassures obtenues par le procédé précédent sur une plaque rectangulaire de plâtre dont l'épaisseur va en augmentant des deux extrémités vers la région médiane. A droite, vue d'une face latérale, montrant la disposition synclinale des cassures produites.

représentés dans les figures 52 et 53 et qui concernent, au contraire, soit une dépression, soit un relief dans le sens transversal. Dans ces conditions, où l'on retrouve encore les conjugaisons précédentes, l'intérêt principal paraît résider dans le plongement des géoclases. La figure 52 fait voir que dans le cas d'une

dépression transversale les cassures sont anticlinales ; tandis qu'à l'inverse la figure 53 relative au relief médian accuse des cassures synclinales. Certainement ces résultats jetteront du jour sur des séries de faits naturels.

La distribution générale des montagnes.

La forme la plus intense des phénomènes de refoulement dont nous venons de nous occuper, consiste dans la surrection des chaînes de montagnes. Quelques géologues cataclysmiens ont essayé de voir dans le phénomène orogénique autre chose que la conséquence des déformations précédemment indiquées, mais c'est sans succès qu'ils ont cherché à dénier aux séismes la faculté de produire des dénivellations persistantes. Confondant les unités de mesures, cependant incommensurables, de la chronologie humaine et de la chronologie planétaire, étonnés de ne pas voir pousser des chaînes depuis les quelques secondes qu'ils observent, ils ont fait valoir des arguments vraiment misérables par leur naïveté.

Aujourd'hui, la question est résolue à l'opposé de ces vues étroites.

Après ce que nous avons dit de l'imitation artificielle des plis et des géoclases, nous n'avons plus qu'à nous occuper de la distribution générale des montagnes, et c'est un sujet qui a tenté bien des géologues à cause de sa liaison avec la déformation finale du globe terrestre, en conséquence de son refroidissement.

On sait comment, à l'aide d'un ballon de caoutchouc surgonflé, recouvert de stéarime et qu'il laissait revenir à sa dimension primitive, de Chancourtois prétendait donner une confirmation expérimentale à la théorie, maintenant vouée à l'oubli, du réseau pentagonal. Ses résultats, tout en manquant le but visé, ont un intérêt qu'on ne peut contester, et à ce titre ils se distinguent essentiellement de ceux qu'on a prétendu invoquer en faveur de cette autre supposition, bien plus injustifiée encore, et qui est connue sous le nom de théorie tétraédrique.

Sans aborder ces problèmes généraux, qui ne sont pas encore accessibles à l'expérimentation, parce que les observations ne sont pas encore assez complètes, nous pouvons nous borner à l'étude d'une région restreinte suffisamment étudiée. Or, il résulte des observations que les grands ridements orographiques de l'Europe sont approximativement parallèles entre eux, concentriques à un point assez voisin du pôle et d'autant moins anciens qu'on les considère sous les latitudes moins élevées.

Dans la région septentrionale a surgi, aux temps les plus reculés, un continent auquel on a donné le nom de massif archéen; un peu au sud-est, se signale le ridement calédonien comprenant les Grampians et les Alpes scandinaves et dont l'âge remonte à l'époque silurienne; le ridement dit hercynien, qui surgit sous le méridien de la Bretagne et se continue par les Sudettes jusqu'à la chaîne de l'Oural, s'est constitué avant les temps carbonifères; le ridement qualifié

d'alpin, dont les Pyrénées, les Alpes, les Carpathes, le Caucase sont des chaînons successifs, s'est soulevé pendant la période tertiaire; enfin le ridement appelé apennin, auquel se rattachent le grand Atlas et les îles de l'Archipel, est si récent qu'on peut penser non achevé encore, le soulèvement qu'il constitue.

Cette disposition est tellement frappante et si régulière qu'il semble qu'elle tienne à une condition générale du globe. Les hypothèses possibles sont nombreuses. L'une d'elles est séduisante par sa simplicité et les expériences de M. Stanislas Meunier lui apportent un concours important. Elle consiste à supposer que la pellicule rocheuse, que nous désignons sous le nom de croûte terrestre, s'est concrétée et s'est épaissie progressivement sur un noyau fluide jouissant d'une certaine viscosité et de propriétés rétractiles analogues à celle que possède le caoutchouc distendu.

Si les choses sont ainsi en réalité, la rotation terrestre ayant, à un certain moment, distendu cette masse extensible avec une intensité strictement réglée, sous chaque parallèle, par sa distance au pôle, les effets de la contraction consécutive au refroidissement ont dû consister dans le développement d'une composante tangentielle dirigée vers les pôles.

C'est sur cette idée que l'expérience a été instituée et la fig. 54 représente l'appareil employé.

Il consiste avant tout en une épaisse feuille de caoutchouc qu'on étire sur une demi-sphère en bois de manière à lui donner la forme d'un demi-ballon.

Chacun des fuseaux dont cette calotte est constituée, se trouve dans une condition dynamique fort approchée de celle de la bande plane de caoutchouc des

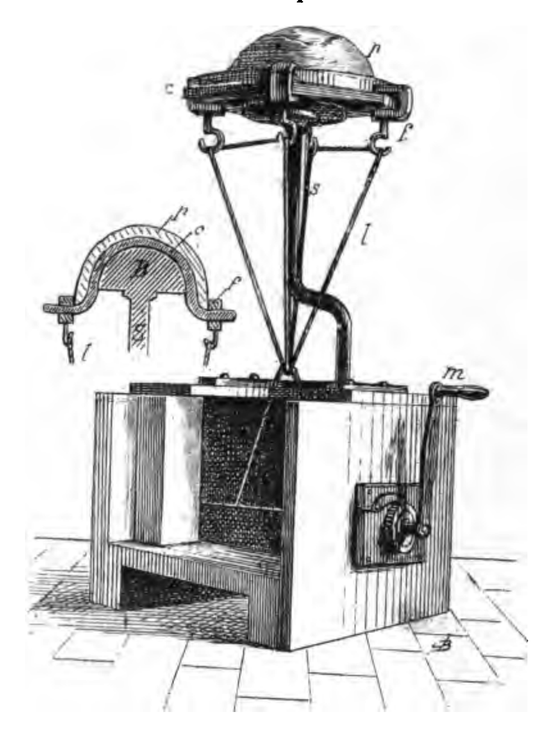


Fig. 54. — Appareil propre à l'étude de l'orogénie expérimentale. A gauche, coupe explicative de la portion supérieure.

expériences précédemment décrites. Et c'est à cause de cette circonstance que nous avons appelé ***pôle*** le bout de la bande plane qui est fixé et à partir duquel se fait la distension; le bout vers lequel par conséquent se fait, à l'inverse, la rétraction.

On peut voir, dans le croquis de gauche de la figure 54, comment est obtenue la forme hémisphérique de

la feuille de caoutchouc. Elle est prise entre deux cadres circulaires en fer, qui sont rattachés solidement entre eux par quatre pinces *f* auxquelles sont fixés des crochets. A ces crochets se rattachent des cordelettes *l* qui viennent s'enrouler sur un arbre horizontal en fer qu'on pourra actionner avec une manivelle *m*.

La feuille de caoutchouc étant ainsi maintenue, on la pose horizontalement sur la demi-sphère de bois B, qui est fixée à l'extrémité d'une solide tige de fer S, puis on tire à l'aide des cordes par le moyen de la manivelle et le caoutchouc en s'étendant prend la forme désirée. Il est désigné par *c* dans la coupe. Cela fait, on dispose sur le cadre un moule en deux parties de forme hémisphérique et qui laisse, entre sa surface interne et le caoutchouc, un intervalle de 2 à 3 centimètres. On y coule, par une ouverture supérieure, du plâtre, seul ou mélangé de sable et d'autres substances, et qu'on laisse prendre jusqu'à un degré convenable. Ce résultat obtenu, on retire le moule et on laisse revenir tout doucement le caoutchouc sur lui-même.

Le caoutchouc, en se contractant, soulève le cadre qui refoule le plâtre, et celui-ci, suivant tous les méridiens, tend à refluer vers le pôle. Alors on voit la région polaire se comporter comme un *butoir* vis-à-vis de toute la matière qui converge vers lui et il ne tarde pas à se faire un bourrelèt très grossièrement circulaire (fig. 55) autour d'une cavité dont la forme varie suivant les cas.

On peut voir dans ce bourrelet l'analogue du continent archéen et, dans la dépression, ce qui ne peut manquer de frapper l'esprit, le correspondant de la mer profonde que M. Nanssen a signalée dans les régions hyperboréennes.



Fig. 55. — Résultat obtenu sur une calotte de plâtre mou, par la rétraction du caoutchouc de l'appareil précédent. Constitution de chaînes concentriques autour de la région polaire relativement affaissée.

Quoique la contraction du caoutchouc soit continue, on voit, en arrière du premier ridement, se constituer une surface non soulevée, et c'est au sud de celle-ci que se fait, à un certain moment, une nouvelle cassure plus ou moins circulaire et le long de laquelle se fait une nouvelle ride que nous pouvons comparer au relief calédonien. Après un nouveau repos relatif, il se déclare un ridement hercynien, etc.

Parmi les observations très nombreuses auxquelles les expériences donnent lieu, il faut remarquer tout d'abord qu'une action *continue* de rétraction y donne lieu à des dislocations discontinues, intermittentes pour ainsi dire, et l'application en est fort importante, par exemple, à la discussion même des grands principes de l'École actualiste.

De même, on y assiste réellement à cette propagation horizontale des soulèvements dont nous avons déjà parlé et qui explique par exemple comment, tout en appartenant à une même ride, les Pyrénées sont antérieures aux Alpes, les Alpes aux Carpathes et ceux-ci au Caucase. Enfin, on peut voir des cassures dirigées suivant les parallèles, associées, après des inflexions, à des chaînes orientées de façon à suivre plus ou moins le méridien, comme fait l'Oural. C'est ce que montre le résultat de l'expérience représentée dans la figure 56, relative à un specimen choisi parmi des séries d'autres. C'est évidemment le correspondant, pour la forme hémisphérique de la masse frangible, des réseaux de cassures compliquées décrits tout à l'heure pour les plaquettes planes.

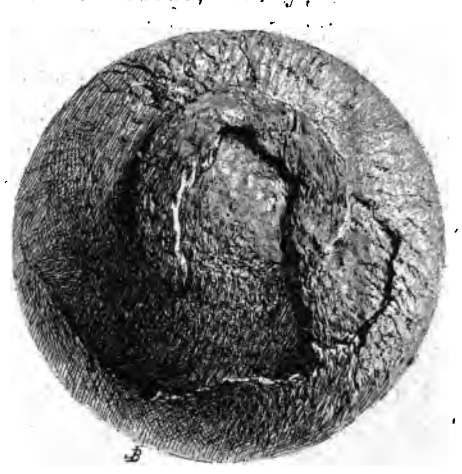


Fig. 56. — Résultat obtenu sur une calotte de plâtre mou, par la rétraction du caoutchouc de l'appareil précédent. Constitution simultanée de chaînes concentriques au pôle, comparables aux Alpes et à l'Himalaya, et de chaînes meridiennes comparables à l'Oural ou aux Andes.

Enfin, de même que M. Faye voit le moteur de la météréologie dans les hautes régions de l'atmosphère, de même il semble qu'il faille voir le moteur des actions orogéniques dans la profondeur terrestre.

En résumé et quoi qu'il en soit de ces remarques,

répétons que les caractères orogéniques généraux de l'Europe se présentent comme s'ils résultaient, avant tout, de la possession, par la surface du noyau fluide de la terre, d'une espèce de viscocité analogue à la contractilité du caoutchouc préalablement distendu. La distension primitive de cette zone superficielle de la matière nucléaire peut être attribuée à la force centrifuge résultant de la rotation du globe autour de son axe; son retirement à sa diminution progressive de volume, consécutive au refroidissement séculaire et dont la composante tangentielle entraînerait vers les pôles et parallèlement à l'équateur les roches superposées.

Un dernier mot est d'ailleurs nécessaire à ce sujet pour prévenir tout malentendu : je ne dis pas, et je tiens fort à le constater, que l'intérieur du globe soit formé d'une matière comparable à du caoutchouc. Mais je dis que, s'il était ainsi composé, les ridements orographiques de l'Europe devraient se présenter comme ils le font en réalité.

Reste à savoir pourquoi les deux hémisphères ne présentent pas les mêmes particularités; mais c'est un point que notre pénurie de documents nous oblige à laisser provisoirement de côté.

POSTFACE

Les faits qui ont été successivement exposés dans ce volume suffisent amplement à justifier la raison d'être de la Géologie expérimentale. Pendant qu'elle est niée encore par quelques personnes aux vues étroites, elle est cultivée par un nombre chaque jour plus grand de chercheurs.

Les questions auxquelles, dès maintenant, elle s'est attaquée avec succès sont de tous les chapitres de la science, et c'est tout ce qu'il faut pour que nous ayons l'assurance que rien ne restera dans l'avenir inaccessible à ses moyens décisifs d'investigation.

Pour notre part, nous serons heureux de contribuer à son développement par tous les moyens, et c'est dans ce but, qu'après en avoir exposé les résultats dans la chaire du Muséum, nous installons dans le même Établissement, une collection publique des appareils qu'elle a mis en œuvre et des produits qu'elle a obtenus.

TABLE DES MATIÈRES

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATION DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE A L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE LA SÉDIMENTATION

LIVRE II

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PHÉNOMÈNES D'ORIGINE PROFONDE

PREMIÈRE PARTIE

APPLICATION DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE A L'HISTOIRE DES PHÉNOMÈNES CHIMIQUES D'ORIGINE PROFONDE

DEUXIÈME PARTIE

APPLICATION DE LA MÉTHODE EXPÉRIMENTALE A L'HISTOIRE DES PHÉNOMÈNES MÉCANIQUES D'ORIGINE PROFONDE

Coulommiers. — Imp. PAUL BRODARD. — 1146-98.

ANCIENNE LIBRAIRIE GERMER BAILLIÈRE ET C[ie]
FÉLIX ALCAN, Éditeur

PHILOSOPHIE — HISTOIRE

CATALOGUE
DES
Livres de Fonds

On peut se procurer tous les ouvrages qui se trouvent dans ce Catalogue par l'intermédiaire des libraires de France et de l'Étranger.

On peut également les recevoir franco *par la poste, sans augmentation des prix désignés, en joignant à la demande des* TIMBRES-POSTE FRANÇAIS *ou un* MANDAT *sur Paris.*

PARIS
108, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 108
Au coin de la rue Hautefeuille

NOVEMBRE 1898

Les titres précédés d'un *astérisque* sont recommandés par le Ministère de l'Instruction publique pour les Bibliothèques des élèves et des professeurs et pour les distributions de prix des lycées et collèges.

BIBLIOTHÈQUE
DE
PHILOSOPHIE CONTEMPORAINE

Volumes in-12, brochés, à 2 fr. 50.

Cartonnés toile, 3 francs. — En demi-reliure, plats papier, 4 francs.

ALAUX, professeur à la Faculté des lettres d'Alger. **Philosophie de M. Cousin.**
ALLIER (R.). ***La Philosophie d'Ernest Renan.** 1895.
ARRÉAT (L.). * **La Morale dans le drame, l'épopée et le roman.** 2e édition.
— ***Mémoire et imagination** (Peintres, Musiciens, Poètes, Orateurs). 1895.
— **Les Croyances de demain.** 1898.
AUBER (Ed.). **Philosophie de la médecine.**
BALLET (G.). **Le Langage intérieur** et les diverses formes de l'aphasie. 2e édit.
BEAUSSIRE, de l'Institut. * **Antécédents de l'hégél. dans la philos. française.**
BERSOT (Ernest), de l'Institut. * **Libre philosophie.**
BERTAULD. **De la Philosophie sociale.**
BERTRAND (A.), professeur à l'Université de Lyon. **La Psychologie de l'effort et les doctrines contemporaines.**
BINET (A.), directeur du lab. de psych. physiol. de la Sorbonne. **La Psychologie du raisonnement,** expériences par l'hypnotisme. 2e édit.
BOST. **Le Protestantisme libéral.**
BOUGLÉ, maître de conférences à l'Université de Montpellier. **Les Sciences sociales en Allemagne.**
BOUTROUX, de l'Institut. * **De la contingence des lois de la nature.** 3e éd. 1896.
CARUS (P.). * **Le Problème de la conscience du moi,** trad. par M. A. MONOD.
COIGNET (Mme). **La Morale indépendante.**
CONTA (B.). ***Les Fondements de la métaphysique,** trad. du roumain par D. TESCANU.
COQUEREL FILS (Ath.). **Transformations historiques du christianisme.**
— **Histoire du Credo.**
— **La Conscience et la Foi.**
COSTE (Ad.). ***Les Conditions sociales du bonheur et de la force.** 3e édit.
CRESSON (A.), agrégé de philosophie. **La Morale de Kant.** 1897. Couronné par l'Institut.
DAURIAC (L.), professeur au lycée Janson-de-Sailly. **La Psychologie dans l'Opéra français** (Auber, Rossini, Meyerbeer). 1897.
DANVILLE (Gaston). **Psychologie de l'amour.** 1894.
DELBŒUF (J.), prof. à l'Université de Liège. **La Matière brute et la Matière vivante.**
DUGAS, docteur ès lettres. * **Le Psittacisme et la pensée symbolique.** 1896.
— **La Timidité.** 1898.
DUMAS (G.), agrégé de philosophie. ***Les états intellectuels dans la Mélancolie. 1894.**
DUNAN, docteur ès lettres. **La théorie psychologique de l'Espace.** 1895.
DURKHEIM (Émile), professeur à l'Université de Bordeaux. * **Les règles méthode sociologique.** 1895.
ESPINAS (A.), prof. à la Sorbonne. * **La Philosophie expérimentale en**
FAIVRE (E.). **De la Variabilité des espèces.**
FÉRÉ (Ch.). **Sensation et Mouvement.** Étude de psycho-mécanique, avec fig.
— **Dégénérescence et Criminalité,** avec figures. 2e édit.
FERRI (E.). **Les Criminels dans l'Art et la Littérature.** 1897.
FIERENS-GEVAERT. **Essai sur l'Art contemporain.** 1897. (Couronné par démie française.)
FLEURY (Maurice de). **L'Ame du criminel.** 1898.

Suite de la *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, format in-12, à 2 fr. 50 le vol.

FONSEGRIVE, professeur au lycée Buffon. **La Causalité efficiente.** 1893.
FONTANÈS. **Le Christianisme moderne.**
FONVIELLE (W. de). **L'Astronomie moderne.**
FRANCK (Ad.), de l'Institut. * **Philosophie du droit pénal.** 4e édit.
— **Des Rapports de la Religion et de l'État.** 2e édit.
— **La Philosophie mystique en France au XVIIIe siècle.**
GAUCKLER. **Le Beau et son histoire.**
GREEF (de). **Les Lois sociologiques.** 2e édit.
GUYAU. * **La Genèse de l'idée de temps.**
HARTMANN (E. de). **La Religion de l'avenir.** 4e édit.
— **Le Darwinisme**, ce qu'il y a de vrai et de faux dans cette doctrine. 6e édit.
HERCKENRATH. (C.-R.-C.) **Problèmes d'Esthétique et de Morale.** 1897.
HERBERT SPENCER. * **Classification des sciences.** 6e édit.
— **L'Individu contre l'État.** 4e édit.
JAELL (Mme). * **La Musique et la psycho-physiologie.** 1895.
JANET (Paul), de l'Institut. * **Le Matérialisme contemporain.** 6e édit.
— * **Philosophie de la Révolution française.** 5e édit.
— * **Les Origines du socialisme contemporain.** 3e édit. 1896.
— * **La Philosophie de Lamennais.**
LACHELIER, de l'Institut. **Du fondement de l'induction**, suivi de **psychologie et métaphysique.** 3e édit. 1898.
LAMPÉRIÈRE (Mme A.). **Rôle social de la femme, son éducation.** 1898.
LANESSAN (J.-L. de). **La Morale des philosophes chinois.** 1896.
LANGE, professeur à l'Université de Copenhague. **Les émotions**, étude psycho physiologique, traduit par G. Dumas. 1895.
LAUGEL (Auguste). **L'Optique et les Arts.**
— * **Les Problèmes de l'âme.**
— **Problème de la nature.**
LEBLAIS. **Matérialisme et Spiritualisme.**
LE BON (Dr Gustave). * **Lois psychol. de l'évolution des peuples.** 2e édit. 1895.
— * **Psychologie des foules.** 3e édit. 1898.
LÉCHALAS. * **Etude sur l'espace et le temps.** 1895.
LE DANTEC, docteur ès sciences. **Le Déterminisme biologique et la Personnalité consciente.** 1897.
— **L'Individualité et l'Erreur individualiste.** 1898.
LEFÈVRE, docteur ès lettres. **Obligation morale et idéalisme.** 1895.
LEOPARDI. **Opuscules et Pensées**, traduit de l'italien par M. Aug. Dapples.
LEVALLOIS (Jules). **Déisme et Christianisme.**
LIARD, de l'Institut. * **Les Logiciens anglais contemporains.** 3e édit.
— **Des définitions géométriques et des définitions empiriques.** 2e édit.
LICHTENBERGER (Henri), professeur adjoint à l'Université de Nancy. **La philosophie de Nietzsche.** 3e édit. 1899.
LOMBROSO. **L'Anthropologie criminelle** et ses récents progrès. 3e édit. 1896.
— **Nouvelles recherches d'anthropologie criminelle et de psychiatrie.** 1892.
— **Les Applications de l'anthropologie criminelle.** 1892.
LUBBOCK (Sir John). * **Le Bonheur de vivre.** 2 volumes. 5e édit.
— * **L'Emploi de la vie.** 2e éd. 1897.
LYON (Georges), maître de conf. à l'École normale. * **La Philosophie de Hobbes.**
MARIANO. **La Philosophie contemporaine en Italie.**
MARION, professeur à la Sorbonne. * **J. Locke, sa vie, son œuvre.** 2e édit.
MAUS (I.), avocat à la Cour d'appel de Bruxelles. **De la Justice pénale.**
MILHAUD (G.), chargé de cours à l'Université de Montpellier. **Essai sur les conditions et les limites de la Certitude logique.** 2e édit. 1898.
— **Le Rationnel.** 1898.
MOSSO. * **La Peur.** Étude psycho-physiologique (avec figures). 2e édit.
— * **La fatigue intellectuelle et physique**, traduit de l'italien par P. Langlois. 2e édit. 1896, avec grav.

Suite de la *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, format in-12, à 2 fr. 50 le vol.

NORDAU (Max). * **Paradoxes psychologiques**, trad. Dietrich. 3e édit. 1898.
— **Paradoxes sociologiques**, trad. Dietrich. 2e édit. 1898.
— **Psycho-physiologie du Génie et du Talent.** 2e édit. 1898.
NOVICOW (J.). **L'Avenir de la Race blanche.** 1897.
OSSIP-LOURIÉ. **Pensées de Tolstoï.** 1898.
PAULHAN (Fr.). **Les Phénomènes affectifs et les lois de leur apparition.**
— * **Joseph de Maistre et sa philosophie.** 1893.
PILLON (F.). **La Philosophie de Ch. Secrétan.** 1898.
PILO (Mario), professeur au lycée de Bellune (Italie). * **La psychologie du Beau et de l'Art**, trad. par Aug. Dietrich. 1895.
PIOGER (Dr Julien). **Le Monde physique**, essai de conception expérimentale. 1893.
QUEYRAT (Fr.), professeur de l'Université. * **L'imagination et ses variétés chez l'enfant.** 2e édit. 1896.
— * **L'abstraction**, son rôle dans l'éducation intellectuelle. 1894.
— **Les Caractères et l'éducation morale.** 1896.
REGNAUD (P.), professeur à l'Université de Lyon. **Logique évolutionniste.** *L'Entendement dans ses rapports avec le langage.* 1897.
— **Comment naissent les mythes.** 1897.
RÉMUSAT (Charles de), de l'Académie française. * **Philosophie religieuse.**
RENARD (Georges), professeur à l'Université de Lausanne. **Le régime socialiste, son organisation politique et économique.** 2e édit. 1898.
RIBOT (Th.), professeur au Collège de France, directeur de la *Revue philosophique*. **La Philosophie de Schopenhauer.** 6e édition.
— * **Les Maladies de la mémoire.** 12e édit.
— * **Les Maladies de la volonté.** 11e édit.
— * **Les Maladies de la personnalité.** 7e édit.
— * **La Psychologie de l'attention.** 4e édit.
RICHARD (G.), docteur ès lettres. * **Le Socialisme et la Science sociale.** 1897.
RICHET (Ch.). **Essai de psychologie générale** (avec figures). 3e édit. 1898.
ROBERTY (E. de). **L'Inconnaissable, sa métaphysique, sa psychologie.**
— **L'Agnosticisme.** Essai sur quelques théories pessim. de la connaissance. 2e édit.
— **La Recherche de l'Unité.** 1 vol. 1893
— **Auguste Comte et Herbert Spencer.** 2e édit.
— * **Le Bien et le Mal.** 1896.
— **Le Psychisme social.** 1897.
— **Les Fondements de l'Ethique.** 1898.
ROISEL. **De la Substance.**
— **L'Idée spiritualiste.** 1897.
SAIGEY. **La Physique moderne.** 2e édit.
SAISSET (Émile), de l'Institut. * **L'Ame et la Vie.**
— * **Critique et Histoire de la philosophie** (fragm. et disc.).
SCHŒBEL. **Philosophie de la raison pure.**
SCHOPENHAUER. * **Le Libre arbitre**, traduit par M. Salomon Reinach. 7e édit.
— * **Le Fondement de la morale**, traduit par M. A. Burdeau. 6e édit.
— **Pensées et Fragments**, avec intr. par M. J. Bourdeau. 13e édit.
SELDEN (Camille). **La Musique en Allemagne**, étude sur Mendelssohn.
SIGHELE. **La Foule criminelle**, essai de psychologie collective.
STRICKER. **Le Langage et la Musique**, traduit de l'allemand par M. Schwiedland.
STUART MILL. * **Auguste Comte et la Philosophie positive.** 6e édit.
— * **L'Utilitarisme.** 2e édit.
— **Correspondance inédite avec Gustave d'Eichthal** (1828-1842) — (1864-1871), avant-propos et trad. par Eug. d'Eichthal. 1898.
TAINE (H.), de l'Académie française. * **Philosophie de l'art dans les Pays-Bas.**
TARDE. **La Criminalité comparée.** 4e édition. 1898.
— * **Les Transformations du Droit.** 2e édit. 1894.
— **Les Lois sociales.** 1898.
THAMIN (R.), professeur au lycée Condorcet, docteur ès lettres. * **Éducation et positivisme** 2e édit. 1895. Ouvrage couronné par l'Institut.

Suite de la *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, format in-12, à 2 fr. 50 le vol.

THOMAS (P. Félix), docteur ès lettres. * **La suggestion**, son rôle dans l'éducation intellectuelle. 2e édit. 1898.
TISSIÉ. * **Les Rêves**, avec préface du professeur Azam. 2e éd. 1898.
VIANNA DE LIMA. **L'Homme selon le transformisme.**
WUNDT. **Hypnotisme et suggestion.** Étude critique, traduit par M. Keller.
ZELLER. **Christian Baur et l'École de Tubingue**, traduit par M. Ritter.
ZIEGLER. **La Question sociale est une Question morale**, traduit par M. Palante. 2e éd. 1894.

BIBLIOTHÈQUE DE PHILOSOPHIE CONTEMPORAINE

Volumes in-8.

Br. à 5 fr., 7 fr. 50 et 10 fr.; Cart. angl., 1 fr. en plus par vol.; Demi-rel. en plus 2 fr. par vol.

ADAM (Ch.), recteur de l'Académie de Dijon. * **La Philosophie en France** (première moitié du XIXe siècle). 7 fr. 50
AGASSIZ.* **De l'Espèce et des Classifications.** 5 fr.
ARRÉAT. * **Psychologie du peintre.** 5 fr.
AUBRY (le Dr P.). **La contagion du meurtre.** 1896. 3e édit. 5 fr.
BAIN (Alex.). **La Logique inductive et déductive.** Traduit de l'anglais par M. G. Compayré. 2 vol. 3e édition. 20 fr.
— * **Les Sens et l'Intelligence.** 1 vol. Traduit par M. Cazelles. 3e édit. 10 fr.
— * **Les Émotions et la Volonté.** Trad. par M. Le Monnier. 10 fr.
BALDWIN (Mark), professeur à l'Université de Princeton (États-Unis). **Le Développement mental chez l'enfant et dans la race.** Trad. Nourry, préface de L. Marillier. 1897. 7 fr. 50
BARNI (Jules). * **La Morale dans la démocratie.** 2e édit. 5 fr.
BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE, de l'Institut. **La Philosophie dans ses rapports avec les sciences et la religion.** 5 fr.
BERGSON (H.), maître de conférences à l'École normale sup. **Matière et mémoire**, essai sur les relations du corps à l'esprit. 1896. 5 fr.
— **Essai sur les données immédiates de la concience.** 2e édit. 1898. 3 fr. 75
BERTRAND, prof. à l'Université de Lyon. **L'Enseignement intégral.** 1898. 5 fr.
BOIRAC (Émile), prof. à l'Université de Dijon. * **L'idée du Phénomène.** 1894. 5 fr.
BOURDEAU (L.). **Le Problème de la mort**, ses solutions imaginaires et la science positive. 2e édition. 1896. 5 fr.
BOURDON, professeur à l'Université de Rennes. * **L'expression des émotions et des tendances dans le langage.** 1892. 7 fr. 50
BOUTROUX (Em.), de l'Institut. **Études d'hist. de la philos.** 1898. 7 fr. 50
BROCHARD (V.), professeur à la Sorbonne. **De l'Erreur.** 1 vol. 2e édit. 1897. 5 fr.
BRUNSCHWICG (E.), docteur ès lettres. * **Spinoza.** 1894. 3 fr. 75
— **La modalité du jugement.** 5 fr.
CARRAU (Ludovic), professeur à la Sorbonne. **La Philosophie religieuse en Angleterre**, depuis Locke jusqu'à nos jours. 5 fr.
CHABOT (Ch.), docteur ès lettres. **Nature et Moralité.** 1897. 5 fr.
CLAY (R.). * **L'Alternative**, *Contribution à la psychologie.* 2e édit. 10 fr.
COLLINS (Howard). * **La Philosophie de Herbert Spencer**, avec préface de M. Herbert Spencer, traduit par H. de Varigny. 2e édit. 1895. 10 fr.
COMTE (Aug.). **La Sociologie**, résumé par E. RIGOLAGE. 1897. 7 fr. 50
CONTA (B.). **Théorie de l'ondulation universelle.** 1894. 3 fr. 75
CRÉPIEUX-JAMIN. **L'Écriture et le Caractère.** 4e édit. 1897. 7 fr. 50
DEWAULE, docteur ès lettres. * **Condillac et la Psych. anglaise contemp.** 5 fr.
DUPROIX (P.), professeur à l'Université de Genève. * **Kant et Fichte et le problème de l'éducation.** 2e édit. 1897. (Ouvrage couronné par l'Académie française.). 5 fr.
DURAND (DE GROS). **Aperçus de taxinomie générale.** 1898. 5 fr.
DURKHEIM, professeur à l'Université de Bordeaux. * **De la division du travail social.** 1893. 7 fr. 50
— **Le Suicide**, *étude sociologique.* 1897. 7 fr. 50

Suite de la *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, format in-8.

DURKHEIM. **L'Année sociologique.** 8e année, 1896-1897, avec la collaboration de MM. SIMMEL, BOUGLÉ, MAUSS, HUBERT, LAPIE, EM. LÉVY, RICHARD, A. MILHAUD, SIMIAUD, MUFFANG, FAUCONNET et PARODI. 10 fr.
ESPINAS (A.), professeur à la Sorbonne. **La philosophie sociale du XVIIIe siècle et la révolution française.** 1898. 7 fr. 50
FERRERO (G.). **Les lois psychologiques du symbolisme.** 1895. 5 fr.
FERRI (Louis), professeur à l'Université de Rome. **La Psychologie de l'association, depuis Hobbes jusqu'à nos jours.** 7 fr. 50
FLINT, prof. à l'Univ. d'Edimbourg. * **La Philos. de l'histoire en Allemagne.** 7 fr. 50
FONSEGRIVE, professeur au lycée Buffon. * **Essai sur le libre arbitre.** Ouvrage couronné par l'Académie des sciences morales et politiques. 2e éd. 1895. 10 fr.
FOUILLÉE (Alf.), de l'Institut. * **La Liberté et le Déterminisme.** 1 vol. 2e édit. 7 fr. 50
— **Critique des systèmes de morale contemporains.** 2e édit. 7 fr. 50
— * **La Morale, l'Art, la Religion,** d'après GUYAU. 2e édit. 3 fr. 75
— **L'Avenir de la Métaphysique fondée sur l'expérience.** 5 fr.
— * **L'Évolutionnisme des idées-forces.** 7 fr. 50
— * **La Psychologie des idées-forces.** 2 vol. 1893. 15 fr.
— * **Tempérament et caractère.** 1895. 7 fr. 50
— **Le Mouvement positiviste et la conception sociol. du monde.** 1896. 7 fr. 50
— **Le Mouvement idéaliste et la réaction contre la science posit.** 1896. 7 fr. 50
— **Psychologie du peuple français.** 7 fr. 50
FRANCK (A.), de l'Institut. **Philosophie du droit civil.** 5 fr.
FULLIQUET. **Essai sur l'Obligation morale.** 1898. 7 fr. 50
GAROFALO, agrégé de l'Université de Naples. **La Criminologie.** 4e édit. 7 fr. 50
— **La superstition socialiste.** 1895. 5 fr.
GOBLOT (E.), docteur ès lettres. **Essai sur la Classif. des sciences.** 1898. 5 fr.
GODFERNAUX (A.), docteur ès lettres. * **Le sentiment et la pensée** et leurs principaux aspects physiologiques. 1894. 5 fr.
GORY (G.), docteur ès lettres. **L'Immanence de la raison dans la connaissance sensible.** 1896. 5 fr.
GREEF (de), prof. à la nouvelle Université libre de Bruxelles. **Le transformisme social.** Essai sur le progrès et le regrès des sociétés. 1895. 7 fr. 50
GURNEY, MYERS et PODMORE. **Les Hallucinations télépathiques,** traduit et abrégé des « *Phantasms of The Living* » par L. MARILLIER, préf. de CH. RICHET. 3e éd. 7 fr. 50
GUYAU (M.). * **La Morale anglaise contemporaine.** 4e édit. 7 fr. 50
— **Les Problèmes de l'esthétique contemporaine.** 5 fr.
— **Esquisse d'une morale sans obligation ni sanction.** 3e édit. 5 fr.
— **L'Irréligion de l'avenir,** étude de sociologie. 5e édit. 7 fr. 50
— * **L'Art au point de vue sociologique.** 7 fr. 50
— * **Hérédité et Education,** étude sociologique. 3e édit. 5 fr.
HERBERT SPENCER. * **Les Premiers principes.** Traduc. Cazelles. 8e éd. 10 fr.
— * **Principes de biologie.** Traduit par M. Cazelles. 4e édit. 2 vol. 20 fr.
— * **Principes de psychologie.** Trad. par MM. Ribot et Espinas. 2 vol. 20 fr.
— * **Principes de sociologie.** 4 vol., traduits par MM. Cazelles et Gerschel : Tome I. 10 fr. — Tome II. 7 fr. 50. — Tome III. 15 fr. — Tome IV. 3 fr. 75
— * **Essais sur le progrès.** Traduit par M. A. Burdeau. 4e édit. 7 fr. 50
— **Essais de politique.** Traduit par M. A. Burdeau. 4e édit. 7 fr. 50
— **Essais scientifiques.** Traduit par M. A. Burdeau. 3e édit. 7 fr. 50
— * **De l'Education physique, intellectuelle et morale.** 10e édit. (Voy. p. 3, 20 et 21.)
HIRTH (G.). * **Physiologie de l'Art.** Trad. et introd. de M. L. Arréat.
HUXLEY, de la Société royale de Londres. * **Hume, sa vie, sa philosophie.** Tra de l'anglais et précédé d'une introduction par M. G. Compayré. 5
IZOULET (J.), professeur au Collège de France. * **La Cité moderne,** métaphys de la sociologie. 4e édit. 1897. 1(
JANET (Paul), de l'Institut. * **Les Causes finales.** 3e édit. 10
— * **Histoire de la science politique dans ses rapports avec la morale.** 2 vol. 3e édit., revue, remaniée et considérablement augmentée.

Suite de la *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, format in-8.

JANET (Paul). * **Victor Cousin et son œuvre.** 3e édition. 7 fr. 50

JANET (Pierre), professeur au lycée Condorcet. * **L'Automatisme psychologique,** essai sur les formes inférieures de l'activité mentale. 2e édit. 1894. 7 fr. 50

LANG (A.). * **Mythes, Cultes et Religion.** Traduit par MM. Marillier et Durr; introduction de Marillier. 1896. 10 fr.

LAVELEYE (de), correspondant de l'Institut. * **De la Propriété et de ses formes primitives.** 4e édit. revue et augmentée. 10 fr.

— * **Le Gouvernement dans la démocratie.** 2 vol. 3e édit. 1896. 15 fr.

LE BON (Dr Gustave). **Psychologie du socialisme.** 1898. 7 fr. 50

LÉVY-BRUHL, docteur ès lettres. * **La Philosophie de Jacobi.** 1894. 5 fr.

LIARD, de l'Institut. * **Descartes.** 5 fr.

— * **La Science positive et la Métaphysique.** 4e édit. 7 fr. 50

LICHTENBERGER (H.), professeur à l'Université de Nancy. **Richard Wagner, poète et penseur.** 2e édit. 1899. 10 fr.

LOMBROSO. * **L'Homme criminel** (criminel-né, fou-moral, épileptique), précédé d'une préface de M. le docteur LETOURNEAU. 3e éd. 2 vol. et atlas. 1895. 36 fr.

LOMBROSO ET FERRERO. **La Femme criminelle et la prostituée.** Avec planches hors texte. 1896. 15 fr.

LOMBROSO et LASCHI. **Le Crime politique et les Révolutions.** 2 vol. avec 13 planches hors texte. 15 fr.

LYON (Georges), maître de conférences à l'École normale supérieure. * **L'Idéalisme en Angleterre au XVIIIe siècle.** 7 fr. 50

MALAPERT (P.), docteur ès lettres. **Les Eléments du caractère et leurs lois de combinaison.** 1897. 5 fr.

MARION (H.), professeur à la Sorbonne. * **De la Solidarité morale.** Essai de psychologie appliquée. 6e édit. 1897. 5 fr.

MARTIN (Fr.), docteur ès lettres. **La perception extérieure et la science positive,** essai de philosophie des sciences. 1894. 5 fr.

MATTHEW ARNOLD. **La Crise religieuse.** 7 fr. 50

MAX MULLER, prof. à l'Université d'Oxford. **Nouvelles études de mythologie,** trad. de l'anglais par L. Job, docteur ès lettres. 1898. 12 fr. 50

NAVILLE (E.), correspond. de l'Institut. **La physique moderne.** 2e édit. 5 fr.

— * **La Logique de l'hypothèse.** 2e édit. 5 fr.

— * **La définition de la philosophie.** 1894. 5 fr.

— **Le Libre arbitre.** 2e édit. 1898. 5 fr.

NORDAU (Max). * **Dégénérescence,** traduit de l'allemand par Aug. Dietrich. 5e éd. 1898. 2 vol. Tome I. 7 fr. 50. Tome II. 10 fr.

— **Les Mensonges conventionnels de notre civilisation,** trad. Dietrich. 5 fr.

NOVICOW. **Les Luttes entre Sociétés humaines** et leurs phases successives. 2e édit. 10 fr.

— * **Les gaspillages des sociétés modernes.** 2e éd. 1899. 5 fr.

OLDENBERG, professeur à l'Université de Kiel. * **Le Bouddha, sa Vie, sa Doctrine, sa Communauté,** trad. par P. Foucher. Préf. de Lucien Lévy. 1894. 7 fr. 50

PAULHAN (Fr.). **L'Activité mentale et les Éléments de l'esprit.** 10 fr.

— **Les types intellectuels : esprits logiques et esprits faux.** 1896. 7 fr. 50

PAYOT (J.), inspecteur d'académie, docteur ès lettres. * **L'Éducation de la volonté.** 8e édit. 1898. 5 fr.

— **De la croyance.** 1896. 5 fr.

PÉRÈS (Jean), docteur ès lettres. **L'Art et le Réel,** essai de métaphysique fondé sur l'esthétique. 1898. 3 fr. 75

PÉREZ (Bernard). **Les Trois premières années de l'enfant.** 5e édit. 5 fr.

— **L'Enfant de trois à sept ans.** 3e édit. 5 fr.

— **L'Éducation morale dès le berceau.** 3e édit. 1896. 5 fr.

— * **L'éducation intellectuelle dès le berceau.** 1896. 5 fr.

PIAT (l'abbé C.), docteur ès lettres. **La Personne humaine.** 1898. (Couronné par l'Institut). 7 fr. 50

— **Destinée de l'homme.** 1898 5 fr.

Suite de la *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, format in-8.

PICAVET (E.), maître de conférences à l'École des hautes études. * **Les Idéologues**, essai sur l'histoire des idées, des théories scientifiques, philosophiques, religieuses, etc., en France, depuis 1789. (Ouvr. couronné par l'Académie française.) 10 fr.
PIDERIT. **La Mimique et la Physiognomonie**. Trad. par M. Girot. 5 fr.
PILLON (F.), * **L'Année philosophique**, 8 années : 1890, 1891, 1892, 1893 (épuisé), 1894, 1895, 1896 et 1897. 8 vol. Chaque volume séparément. 5 fr.
PIOGER (J.). **La Vie et la Pensée**, essai de conception expérimentale. 1894. 5 fr.
— **La vie sociale, la morale et le progrès**. 1894. 5 fr.
PREYER, prof. à l'Université de Berlin. **Éléments de physiologie**. 5 fr.
— * **L'Ame de l'enfant**. Développement psychique des premières années. 10 fr.
PROAL. * **Le Crime et la Peine**. 2e édit. (Couronné par l'Institut). 10 fr.
— * **La criminalité politique**. 1895. 5 fr.
RAUH, professeur à l'Université de Toulouse. **De la méthode dans la psychologie des sentiments**. 1899. 5 fr.
RÉCEJAC, docteur ès lettres. **Essai sur les Fondements de la Connaissance mystique**. 1897. 5 fr.
RIBOT (Th.). * **L'Hérédité psychologique**. 5e édit. 7 fr. 50
— * **La Psychologie anglaise contemporaine**. 3e édit. 7 fr. 50
— * **La Psychologie allemande contemporaine**. 4e édit. 7 fr. 50
— **La psychologie des sentiments**. 2e édit. 1897. 7 fr. 50
— **L'Evolution des idées générales**. 1897. 5 fr.
RICARDOU (A.), docteur ès lettres. * **De l'Idéal**. (Couronné par l'Institut.) 5 fr.
ROBERTY (E. de). **L'Ancienne et la Nouvelle philosophie**. 7 fr. 50
— * **La Philosophie du siècle** (positivisme, criticisme, évolutionnisme). 5 fr.
ROMANES. * **L'Évolution mentale chez l'homme**. 7 fr. 50
SAIGEY (E.). * **Les Sciences au XVIIIe siècle**. La Physique de Voltaire. 5 fr.
SANZ Y ESCARTIN. **L'Individu et la réforme sociale**, traduit de l'espagnol par Aug. Dietrich. 1898. 7 fr. 50
SCHOPENHAUER. **Aphorismes sur la sagesse dans la vie**. 6e édit. Traduit par M. Cantacuzène. 5 fr.
— * **De la Quadruple racine du principe de la raison suffisante**, suivi d'une *Histoire de la doctrine de l'idéal et du réel*. Trad. par M. Cantacuzène. 5 fr.
— * **Le Monde comme volonté et comme représentation**. Traduit par M. A. Burdeau. 2e éd. 3 vol. Chacun séparément. 7 fr. 50
SÉAILLES (G.), maître de conférences à la Sorbonne. **Essai sur le génie dans l'art**. 2e édit. 1897. 5 fr.
SERGI, professeur à l'Université de Rome. **La Psychologie physiologique**, traduit de l'italien par M. Mouton. Avec figures. 7 fr. 50
SOLLIER (Dr P.). * **Psychologie de l'idiot et de l'imbécile**. 5 fr.
SOURIAU (Paul), prof. à l'Univ. de Nancy. **L'Esthétique du mouvement**. 5 fr.
— * **La suggestion dans l'art**. 5 fr.
STUART MILL. * **Mes Mémoires**. Histoire de ma vie et de mes idées. 3e éd. 5 fr.
— * **Système de logique déductive et inductive**. 4e édit. 2 vol. 20 fr.
— * **Essais sur la religion**. 2e édit. 5 fr.
— **Lettres inédites à Aug. Comte et réponses d'Aug. Comte**, publiées et précédées d'une introduction par L. Lévy Bruhl. 1899. 10 fr.
SULLY (James). **Le Pessimisme**. Trad. Bertrand. 2e édit. 7 fr. 50
— **Études sur l'enfance**. Trad. A. Monod, préface de G. Compayré. 1898. 10 fr.
TARDE (G.). * **La logique sociale**. 2e édit. 1898. 7 f
— * **Les lois de l'imitation**. 2e édit. 1895. 7 f.
— **L'Opposition universelle**. *Essai d'une théorie des contraires*. 1897. 7
THOMAS (P F.), docteur ès lettres. **L'Éducation des sentiments**. 1898.
THOUVEREZ (Émile), docteur ès lettres. **Le Réalisme métaphysique**. 1894. ronné par l'Institut.
VACHEROT (Et.), de l'Institut. * **Essais de philosophie critique**. 7 fr
— **La Religion**. 7 f
WUNDT. **Eléments de psychologie physiologique**. 2 vol. avec figures. 2

COLLECTION HISTORIQUE DES GRANDS PHILOSOPHES

PHILOSOPHIE ANCIENNE

ARISTOTE (Œuvres d'), traduction de J. BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE, de l'Institut.

— * **Rhétorique.** 2 vol. in-8. 16 fr.

— * **Politique.** 1 vol. in-8... 10 fr.

— **La Métaphysique d'Aristote.** 3 vol. in-8. .... 30 fr.

— **De la Logique d'Aristote,** par M. BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE. 2 vol. in-8............. 10 fr.

— **Table alphabétique des matières de la traduction générale d'Aristote,** par M. BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE, 2 forts vol. in-8. 1892 .... 30 fr.

— **L'Esthétique d'Aristote,** par M. BÉNARD. 1 vol. in-8. 1889. 5 fr.

SOCRATE. * **La Philosophie de Socrate,** par Alf. FOUILLÉE. 2 vol. in-8.................. 16 fr.

— **Le Procès de Socrate,** par G. SOREL. 1 vol. in-8...... 3 fr. 50

PLATON. **Études sur la Dialectique dans Platon et dans Hegel,** par Paul JANET. 1 vol. in-8. 6 fr.

—* **Platon, sa philosophie,** sa vie et de ses œuvres, par CH. BÉNARD. 1 vol. in-8. 1893....... 10 fr.

— **La Théorie platonicienne des Sciences,** par ÉLIE HALÉVY. In-8. 1895.................. 5 fr.

PLATON. **Œuvres,** traduction VICTOR COUSIN revue par J. BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE : Socrate et Platon ou le Platonisme — Eutyphron — Apologie de Socrate — Criton — Phédon. 1 vol. in-8. 1896. 7 fr. 50

ÉPICURE.* **La Morale d'Épicure** et ses rapports avec les doctrines contemporaines, par M. GUYAU. 1 volume in-8. 3e édit...... 7 fr. 50

BÉNARD. **La Philosophie ancienne,** histoire de ses systèmes. *La Philosophie et la Sagesse orientales. — La Philosophie grecque avant Socrate. — Socrate et les socratiques. — Etudes sur les sophistes grecs.* 1 v. in-8........... 9 fr.

FABRE (Joseph). * **Histoire de la philosophie, antiquité et moyen âge.** 1 vol. in-18. .... 3 fr. 50

FAVRE (Mme Jules), née VELTEN. **La Morale des stoïciens.** In-18. 3 fr. 50

— **La Morale de Socrate.** In-18. 3 fr. 50

— **La Morale d'Aristote.** In-18. 3 fr. 50

OGEREAU. **Système philosophique des stoïciens.** In-8..... 5 fr.

RODIER (G.). * **La Physique de Straton de Lampsaque.** In-8. 3 fr.

TANNERY (Paul), **Pour l'histoire de la science hellène** (de Thalès à Empédocle). 1 v. in-8. 1887.............. 7 fr. 50

MILHAUD (G.). * **Les origines de la science grecque.** 1 vol. in-8. 1893 .... 5 fr.

PHILOSOPHIE MODERNE

* DESCARTES, par L. LIARD. 1 vol. in-8.................. 5 fr.

— **Essai sur l'Esthétique de Descartes,** par E. KRANTZ. 1 vol. in-8. 2e éd. 1897........... 6 fr.

SPINOZA. **Benedicti de Spinoza opera,** quotquot reperta sunt, recognoverunt J. Van Vloten et J.-P.-N. Land. 2 forts vol. in-8 sur papier de Hollande. .... 45 fr.

Le même en 3 volumes élégamment reliés........... 18 fr.

— **Inventaire des livres formant sa bibliothèque,** publié d'après un document inédit avec des notes biographiques et bibliographiques et une introduction par A.-J. SERVAAS VAN RVOIJEN. 1 v. in-4 sur papier de Hollande....... 15 fr.

GEULINCK (Arnoldi). **Opera philosophica** recognovit J.-P.-N. LAND, 3 volumes, sur papier de Hollande, gr. in-8. Chaque vol... 17 fr. 75

GASSENDI. **La Philosophie de Gassendi,** par P.-F. THOMAS. In-8. 1889.................. 6 fr.

LOCKE. * **Sa vie et ses œuvres,** par MARION. In-18. 3e éd... 2 fr. 50

MALEBRANCHE. * **La Philosophie de Malebranche,** par OLLÉ-LAPRUNE, de l'Institut. 2 volumes. in-8.................. 16 fr.

PASCAL. Études sur le scepticisme de Pascal, par DROZ. 1 vol. in-8.............. 6 fr.

VOLTAIRE. **Les Sciences au XVIIIe siècle.** Voltaire physicien, par Em. SAIGEY. 1 vol. in-8. 5 fr.

FRANCK (Ad.), de l'Institut. **La Philosophie mystique en France au XVIIIe siècle.** 1 volume in-18............... 2 fr. 50

DAMIRON. **Mémoires pour servir à l'histoire de la philosophie au XVIIIe siècle.** 3 vol. in-8. 15 fr.

J.-J. ROUSSEAU. **Du Contrat social**, édition comprenant avec le texte définitif les versions primitives de l'ouvrage d'après les manuscrits de Genève et de Neuchâtel, avec introduction, par EDMOND DREYFUS-BRISAC. 1 fort volume grand in-8. 12 fr.

PHILOSOPHIE ÉCOSSAISE

DUGALD STEWART. * **Éléments de la philosophie de l'esprit humain.** 3 vol. in-12..... 9 fr.

HUME. * **Sa vie et sa philosophie**, par Th. HUXLEY. 1 vol. in-8. 5 fr.

BACON. **Étude sur François Bacon**, par J. BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE. In-18......... 2 fr. 50

BACON. * **Philosophie de François Bacon**, par CH. ADAM. (Couronné par l'Institut). In-8..... 7 fr. 50

BERKELEY. **Œuvres choisies.** *Essai d'une nouvelle théorie de la vision. Dialogues d'Hylas et de Philonoüs.* Traduit de l'anglais par MM. BEAULAVON (G.) et PARODI (D.). In-8. 1895............. 5 fr.

PHILOSOPHIE ALLEMANDE

KANT. **La Critique de la raison pratique**, traduction nouvelle avec introduction et notes, par M. PICAVET. 1 vol. in-8. .... 6 fr.

— **Éclaircissements sur la Critique de la raison pure**, trad. TISSOT. 1 vol. in-8....... 6 fr.

— * **Principes métaphysiques de la morale**, et *Fondements de la métaphysique des mœurs*, traduct. TISSOT. In-8............ 8 fr.

— **Doctrine de la vertu**, traduction BARNI. 1 vol. in-8........ 8 fr.

— * **Mélanges de logique**, traduction TISSOT. 1 v. in-8..... 6 fr.

— * **Prolégomènes à toute métaphysique future** qui se présentera comme science, traduction TISSOT. 1 vol. in-8........ 6 fr.

— * **Anthropologie**, suivie de divers fragments relatifs aux rapports du physique et du moral de l'homme, et du commerce des esprits d'un monde à l'autre, traduction TISSOT. 1 vol. in-8....... 6 fr.

— **Traité de pédagogie**, trad. J. BARNI; préface et notes par M. Raymond THAMIN. 1 vol. in-12. 1 fr. 50

— **Essai critique sur l'Esthétique de Kant**, par V. BASCH. 1 vol. in-8. 1896. .... 10 fr.

— **Sa morale**, par CRESSON. 1 vol. in-12.............. 2 fr. 50

KANT et FICHTE **et le problème de l'éducation**, par PAUL DUPROIX. 1 vol. in-8. 1897....... 5 fr.

SCHELLING. **Bruno**, ou du principe divin. 1 vol. in-8....... 3 fr. 50

HEGEL. * **Logique.** 2 vol. in-8. 14 fr.

— * **Philosophie de la nature.** 3 vol. in-8............. 25 fr.

— * **Philosophie de l'esprit.** 2 vol. in-8.................. 18 fr.

— * **Philosophie de la religion.** 2 vol. in-8............ 20 fr.

— **La Poétique**, trad. par M. Ch. BÉNARD. Extraits de Schiller, Gœthe, Jean-Paul, etc., 2 v. in-8. 12 fr.

— **Esthétique.** 2 vol. in-8, trad. BÉNARD............... 16 fr.

— **Antécédents de l'hégélianisme dans la philosophie française**, par E. BEAUSSIRE. 1 vol. in-18........... 2 fr. 50

— **Introduction à la philosophie de Hegel**, par VÉRA. 1 vol. in-8. 2e édit............... 6 fr. 50

— **La logique de Hegel**, par EUG. NOEL In-8. 1897........ 3 fr.

HERBART. **Principales œuvres pédagogiques**, trad. A. PINLOCHE. In-8. 1894........... 7 fr. 50

HUMBOLDT (G. de). **Essai sur les limites de l'action de l'É** in-8 .... 3 fr

MAUXION (M.). **La métaphysi de Herbart et la critique Kant.** 1 vol. in-8..... 7 fr

RICHTER (Jean-Paul-Fr.). **Poéti ou Introduction à l'Esthéti** 2 vol. in-8. 1862....... 1

SCHILLER. **Son esthétique,** FR. MONTARGIS. In-8.....

PHILOSOPHIE ANGLAISE CONTEMPORAINE

(Voir *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, pages 2 et 5.)

ARNOLD (Matt.). — BAIN (Alex). — CARRAU (Lud.). — CLAY (R.). — COLLINS (H.). — CARUS. — FERRI (L.). — FLINT. — GUYAU. — GURNEY, MYERS et PODMOR. — HERBERT-SPENCER. — HUXLEY. — LIARD. — LANG, — LUBBOCK (Sir John). — LYON (Georges). — MARION. — MAUDSLEY. — STUART-MILL (JOHN). — ROMANES. — SULLY (James).

PHILOSOPHIE ALLEMANDE CONTEMPORAINE

(Voir *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, pages 2 et 5.)

BOUGLÉ — HARTMANN (E. de). — NORDAU (Max). — NIETZSCHE. — OLDENBERG. — PIDERIT. — PREYER. — RIBOT (Th.). — SCHMIDT (O.). — SCHŒBEL. — SCHOPENHAUER. — SELDEN (C.). — STRICKER. — WUNDT. — ZELLER. — ZIEGLER.

PHILOSOPHIE ITALIENNE CONTEMPORAINE

(Voir *Bibliothèque de philosophie contemporaine*, pages 2 et 5.)

ESPINAS. — FERRERO. — FERRI (Enrico). — FERRI (L.). — GAROFALO. — LÉOPARDI. — LOMBROSO. — LOMBROSO et FERRERO. — LOMBROSO et LASCHI. — MARIANO. — MOSSO. — PILO (Marco). — SERGI. — SIGHELE.

LES GRANDS PHILOSOPHES

Publié sous la direction de M. l'Abbé PIAT

Sous ce titre, M. L'ABBÉ PIAT, agrégé de philosophie, docteur es lettres, professeur à l'Ecole des Carmes, va publier, avec la collaboration de savants et de philosophes connus, une série d'études consacrées aux grands philosophes: *Socrate, Platon, Aristote, Philon, Plotin* et *Saint Augustin; Saint Anselme, Saint Bonaventure, Saint Thomas d'Aquin* et *Dunsscot, Malebranche, Pascal, Spinoza, Leibniz, Kant, Hégel, Herbert Spencer*, etc.

Chaque étude formera un volume in-8° carré de 300 pages environ, du prix de 5 francs.

PARAITRONT DANS LE COURANT DE L'ANNÉE 1899 :

Avicenne, par le baron CARRA DE VAUX.

Saint Anselme, par M. DOMET DE VORGES, ancien ministre plénipotentiaire.

Socrate, par M. l'abbé PIAT.

Saint Augustin, par M. l'abbé JULES MARTIN.

Descartes, par M. le baron Denys COCHIN, député de Paris.

Saint Thomas d'Aquin, par Mgr MERCIER, directeur de l'Institut supérieur de philosophie de l'Université de Louvain, et par M. DE WULF, professeur au même Institut.

Malebranche, par M. Henri JOLY, ancien doyen de la Faculté des lettres de Dijon.

Saint Bonaventure, par Mgr DADOLLE, recteur des Facultés libres de Lyon.

Maine de Biran, par M. Marius COUAILHAC, docteur ès lettres.

Rosmini, par M. BAZAILLAS, agrégé de l'Université, professeur au collège Stanislas.

Pascal, par M. HATZFELD, professeur honoraire au lycée Louis-le-Grand.

Kant, par M. RUYSSEN, agrégé de l'Université, professeur au lycée de La Rochelle.

Spinoza, par M. G. FONSEGRIVE, professeur au lycée Buffon.

Dunsscot, par le R. P. DAVID FLEMING, définiteur général de l'ordre des Franciscains.

BIBLIOTHÈQUE GÉNÉRALE
DES
SCIENCES SOCIALES

SECRÉTAIRE DE LA RÉDACTION :

DICK MAY, Secrétaire général du Collège libre des Sciences sociales.

L'éditeur de la *Bibliothèque de philosophie contemporaine* a toujours réservé dans cette collection une place à la science sociale : les rapports de celle-ci avec la psychologie des peuples et avec la morale justifient ce classement et, à ces titres divers, elle intéresse les philosophes.

Mais, depuis plusieurs années, le cercle des études sociales s'est élargi ; elles sont sorties du domaine de l'observation pour entrer dans celui des applications pratiques et de l'histoire, qui s'adressent à un plus nombreux public.

Aussi ont-elles pris leur place dans le haut enseignement ; elles ont leurs représentants dans les Facultés des lettres et de droit, au Collège de France, à l'École libre des sciences politiques. La récente fondation du *Collège libre des sciences sociales* a montré la diversité et l'utilité des questions qui font partie de leur domaine ; les nombreux auditeurs qui en suivent les cours et conférences prouvent par leur présence que cette nouvelle institution répond à un besoin de curiosité générale.

C'est pour répondre à ce même besoin que l'éditeur de la *Bibliothèque de philosophie contemporaine* fonde la *Bibliothèque générale des sciences sociales*. Les premiers volumes de cette *Bibliothèque* seront la reproduction des leçons professées dans ces deux dernières années au Collège libre. La collaboration de son distingué secrétaire général assure à la *Bibliotheque* la continuation du concours de ses professeurs et conférenciers.

La *Bibliothèque générale des sciences sociales* sera d'ailleurs ouverte à tous les travaux intéressants, quelles que soient les opinions des sociologues qui leur apporteront leur concours, et l'école à laquelle ils appartiendront.

Les volumes, dont les titres suivent, seront publiés dans le courant de l'année 1898, les trois premiers devant paraître aux mois de mars et avril prochains :

VOLUMES PUBLIÉS :

L'individualisation de la peine, par R. SALEILLES, professeur agrégé à la Faculté de droit de l'Université de Paris.

L'idéalisme social, par Eugène FOURNIÈRE, député, professeur au Collège libre des sciences sociales.

Ouvriers du temps passé (XV[e] et XVI[e] siècles), par H. HAUSER, professeur à l'Université de Clermont-Ferrand.

Chaque volume in-8° carré de 300 pages environ, cartonné à l'anglaise..... 6 fr.

EN PRÉPARATION :

La méthode historique appliquée aux sciences sociales, par Charles SEIGNOBOS, maître de conférences à la Faculté des lettres de l'Université de Paris.

La formation de la démocratie socialiste en France, par Albert MÉTIN, agrégé de l'Université.

Le mouvement social catholique depuis l'encyclique *Rerum novarum*, par Max TURMANN.

La méthode géographique appliquée aux sciences sociales, par Jean BRUNHES, professeur à l'Université de Fribourg (Suisse).

Les Bourses, par THALLER, professeur à la Faculté de droit de l'Université de Paris

La décomposition du Marxisme, par Ch. ANDLER, maître de confér— l'École normale supérieure.

La statique sociale, par le D[r] DELBET, député, directeur du Collège li sciences sociales.

Le monisme économique (sociologie marxiste), par DE KELLÈS-KRAUZ.

L'organisation industrielle moderne. Ses caractères, son développem— Maurice DUFOURMENTELLE.

Précis d'économie sociale. *Le Play et la méthode d'observation*, par Alex LAIRE, secrétaire général de la Société d'économie sociale.

Les enquêtes (théorie et pratique), par M. P. DU MAROUSSEM, docteur en di

BIBLIOTHÈQUE
D'HISTOIRE CONTEMPORAINE

Volumes in-12 brochés à 3 fr. 50. — Volumes in-8 brochés de divers prix

Cartonnage anglais, 50 cent. par vol. in-12; 1 fr. par vol. in-8.

Demi-reliure, 1 fr. 50 par vol. in-12; 2 fr. par vol. in-8.

EUROPE

SYBEL (H. de). * **Histoire de l'Europe pendant la Révolution française,** traduit de l'allemand par Mlle Dosquet. Ouvrage complet en 6 vol. in-8. 42 fr.

DEBIDOUR, inspecteur général de l'Instruction publique. * **Histoire diplomatique de l'Europe, de 1815 à 1878.** 2 vol. in-8. (Ouvrage couronné par l'Institut.) 18 fr.

FRANCE

AULARD, professeur à la Sorbonne. * **Le Culte de la Raison et le Culte de l'Être suprême,** étude historique (1793-1794). 1 vol. in-12. 3 fr. 50

— * **Études et leçons sur la Révolution française.** 2 vol. in-12. Chacun. 3 fr. 50

DESPOIS (Eug.). * **Le Vandalisme révolutionnaire.** Fondations littéraires, scientifiques et artistiques de la Convention. 4e édition, précédée d'une notice sur l'auteur par M. Charles Bigot. 1 vol. in-12. 3 fr. 50

DEBIDOUR, inspecteur général de l'instruction publique. **Histoire des rapports de l'Église et de l'État en France** (1789-1870). 1 fort vol. in-8. 1898. 12 fr.

ISAMBERT (G.). * **La vie à Paris pendant une année de la Révolution** (1791-1792). 1 vol. in-12. 1896. 3 fr. 50

MARCELLIN PELLET, ancien député. **Variétés révolutionnaires.** 3 vol. in-12, précédés d'une préface de A. Ranc. Chaque vol. séparém. 3 fr. 50

BONDOIS (P.), agrégé de l'Université. * **Napoléon et la société de son temps** (1793-1821). 1 vol. in-8. 7 fr.

CARNOT (H.), sénateur. * **La Révolution française,** résumé historique. 1 volume in-12. Nouvelle édit. 3 fr. 50

BLANC (Louis). * **Histoire de Dix ans** (1830-1840). 5 vol. in-8. 25 fr.

— 25 pl. en taille-douce. Illustrations pour l'*Histoire de Dix ans*. 6 fr.

ÉLIAS REGNAULT. Histoire de Huit ans (1840-1848). 3 vol. in-8. 15 fr.

— 14 planches en taille-douce. Illustrations pour l'*Histoire de Huit ans*. 4 fr.

GAFFAREL (P.), professeur à l'Université de Dijon. * **Les Colonies françaises.** 1 vol. in-8. 5e édit. 5 fr.

LAUGEL (A.). * **La France politique et sociale.** 1 vol. in-8. 5 fr.

ROCHAU (de). Histoire de la Restauration. 1 vol. in-12. 3 fr. 50

SPULLER (E.), ancien ministre de l'Instruction publique. * **Figures disparues,** portraits contemp., littér. et politiq. 3 vol. in-12. Chacun. 3 fr. 50

— **Histoire parlementaire de la deuxième République.** 1 volume in-12. 2e édit. 3 fr. 50

— **Hommes et choses de la Révolution.** 1 vol. in-12. 1896. 3 fr. 50

TAXILE DELORD. * **Histoire du second Empire** (1848-1870). 6 v. in-8. 42 fr.

ZEVORT (E.), recteur de l'Académie de Caen. **Histoire de la troisième République:**

Tome I. * **La présidence de M. Thiers** 1 vol. in-8. 1896. 7 fr.
Tome II. * **La présidence du Maréchal.** 1 vol. in-8. 1897. 7 fr.
Tome III. **La présidence de Jules Grévy.** 1 vol. in-8. 7 fr.
Tome IV. **La présidence de Sadi-Carnot.** 1 vol. in-8. (*Sous presse.*) 7 fr.

WAHL, inspecteur général honoraire de l'Instruction aux colonies. * **L'Algérie.** 1 vol. in-8. 3e édit. refondue. (Ouvrage couronné par l'Institut.) 5 fr.

LANESSAN (de). L'Expansion coloniale de la France. Étude économique, politique et géographique sur les établissements français d'outre-mer. 1 fort vol. in-8, avec cartes. 1886. 12 fr.

— ***L'Indo-Chine française.** Étude économique, politique et administrative sur *la Cochinchine, le Cambodge, l'Annam et le Tonkin.* (Ouvrage couronné par la Société de géographie commerciale de Paris, médaille Dupleix.) 1 vol. in-8, avec 5 cartes en couleurs hors texte. 15 fr.

— * **La colonisation française en Indo-Chine.** 1 vol. in-12, avec une carte de l'Indo-Chine. 1895. 3 fr. 50

LAPIE (P.), agrégé de l'Université. **Les Civilisations tunisiennes** (Musulmans, Israélites, Européens). 1 v. in-12. 1898. (Couronné par l'Académie française.) 3 fr. 50

SILVESTRE (J.). **L'Empire d'Annam et les Annamites,** publié sous les auspices de l'administration des colonies. 1 v. in-12, avec 1 carte de l'Annam. 3 fr. 50

WEILL (Georges), agrégé de l'Université, docteur ès lettres. **L'École saint-simonienne,** son histoire, son influence jusqu'à nos jours. 1 vol. in-12. 1896. 3 fr. 50

ANGLETERRE

LAUGEL (Aug.). * **Lord Palmerston et lord Russell.** 1 vol. in-12. 3 fr. 50

SIR CORNEWAL LEWIS. * **Histoire gouvernementale de l'Angleterre depuis 1770 jusqu'à 1830.** Traduit de l'anglais. 1 vol. in-8. 7 fr.

REYNALD (H.), doyen de la Faculté des lettres d'Aix. * **Histoire de l'Angleterre,** depuis la reine Anne jusqu'à nos jours. 1 vol. in-12. 2e éd. 3 fr. 50

MÉTIN (Albert). **Le Socialisme en Angleterre.** 1 vol. in-12. 1897. 3 fr. 50

ALLEMAGNE

VÉRON (Eug.). * **Histoire de la Prusse,** depuis la mort de Frédéric II jusqu'à la bataille de Sadowa. 1 vol. in-12. 6e édit., augmentée d'un chapitre nouveau contenant le résumé des événements jusqu'à nos jours, par P. Bondois, professeur agrégé d'histoire au lycée Buffon. 3 fr. 50

— * **Histoire de l'Allemagne,** depuis la bataille de Sadowa jusqu'à nos jours. 1 vol. in-12. 3e éd., mise au courant des événements par P. Bondois. 3 fr. 50

ANDLER (Ch.), maître de conférences à l'Ecole normale. **Les origines du socialisme d'état en Allemagne.** 1 vol. in-8. 1897. 7 fr.

AUTRICHE-HONGRIE

ASSELINE (L.). * **Histoire de l'Autriche,** depuis la mort de Marie-Thérèse jusqu'à nos jours. 1 vol. in-12. 3e édit. 3 fr. 50

SAYOUS (Ed.), professeur à la Faculté des lettres de Toulouse. **Histoire des Hongrois** et de leur littérature politique, de 1790 à 1815. 1 vol. in-18. 3 fr. 50

BOURLIER (J.). * **Les Tchèques et la Bohème contemporaine,** avec préface de M. Flourens, ancien ministre des Affaires étrangères. 1 vol. in-12. 1897. 3 fr. 50

AUERBACH, professeur à la Faculté des lettres de Nancy. **Les races et les nationalités en Autriche-Hongrie.** 1 vol. in-8, avec une carte hors texte. 1898. 5 fr.

ITALIE

SORIN (Élie). * **Histoire de l'Italie,** depuis 1815 jusqu'à la mort de Vi Emmanuel. 1 vol. in-12. 1888. 3 fr.

GAFFAREL (P.), professeur à la Faculté des lettres de Dijon. * **Bonapa et les Républiques italiennes** (1796-1799). 1895. 1 vol. in-8. 5

ESPAGNE

REYNALD (H.). * **Histoire de l'Espagne,** depuis la mort de Charle jusqu'à nos jours. 1 vol. in-12. 3 fr

RUSSIE

CRÉHANGE (M.), agrégé de l'Université. * **Histoire contemporaine de la Russie**, depuis la mort de Paul Ier jusqu'à l'avènement de Nicolas II (1801-1894). 1 vol. in-12. 2e édit. 1895. 3 fr. 50

SUISSE

DAENDLIKER. * **Histoire du peuple suisse.** Trad. de l'allem. par Mme Jules FAVRE et précédé d'une Introduction de Jules FAVRE. 1 vol. in-8. 5 fr.

GRÈCE & TURQUIE

BÉRARD (V.), docteur ès lettres. * **La Turquie et l'Hellénisme contemporain.** (Ouvrage cour. par l'Acad. française). 1 v. in-12. 2e éd. 1895. 3 fr. 50

AMÉRIQUE

DEBERLE (Alf.). * **Histoire de l'Amérique du Sud**, depuis sa conquête jusqu'à nos jours. 1 vol. in-12. 3e édit., revue par A. MILHAUD, agrégé de l'Université. 3 fr. 50

BARNI (Jules). * **Histoire des idées morales et politiques en France au XVIIIe siècle.** 2 vol. in-12. Chaque volume. 3 fr. 50

— * **Les Moralistes français au XVIIIe siècle.** 1 vol. in-12 faisant suite aux deux précédents. 3 fr. 50

BEAUSSIRE (Émile), de l'Institut. **La Guerre étrangère et la Guerre civile.** 1 vol. in-12. 3 fr. 50

BOURDEAU (J.). * **Le Socialisme allemand et le Nihilisme russe.** 1 vol. in-12. 2e édit. 1894. 3 fr. 50

D'EICHTHAL (Eug.). **Souveraineté du peuple et gouvernement.** 1 vol. in-12. 1895. 3 fr. 50

DEPASSE (Hector). **Transformations sociales.** 1894. 1 vol. in-12. 3 fr. 50

— **Du Travail et de ses conditions** (Chambres et Conseils du travail). 1 vol. in-12. 1895. 3 fr. 50

DRIAULT (E.). **La question d'Orient**, préface de G. MONOD, de l'Institut 1 vol. in-8. 1898. 7 fr.

GUÉROULT (G.). * **Le Centenaire de 1789**, évolution polit., philos., artist. et scient. de l'Europe depuis cent ans. 1 vol. in-12. 1889. 3 fr. 50

LAVELEYE (E. de), correspondant de l'Institut. **Le Socialisme contemporain.** 1 vol. in-12. 10e édit. augmentée. 3 fr. 50

LICHTENBERGER (A). **Le Socialisme utopique, étude sur quelques précurseurs du Socialisme.** 1 vol. in-12. 1898. 3 fr. 50

— **Le Socialisme et la Révolution française.** 1 vol. in-8. 5 fr.

MATTER (P.). **La dissolution des assemblées parlementaires**, étude de droit public et d'histoire. 1 vol. in-8. 1898. 5 fr.

REINACH (Joseph). **Pages républicaines.** 1894. 1 vol. in-12. 3 fr. 50

SPULLER (E.). * **Éducation de la démocratie.** 1 vol. in-12. 1892. 3 fr. 50

— **L'Évolution politique et sociale de l'Église.** 1 vol. in-12. 1893. 3 fr. 50

BIBLIOTHÈQUE HISTORIQUE ET POLITIQUE

DESCHANEL (E.), sénateur, professeur au Collège de France. * **Le Peuple et la Bourgeoisie.** 1 vol. in-8. 2e édit. 5 fr.

DU CASSE. **Les Rois frères de Napoléon Ier.** 1 vol. in-8. 10 fr.

LOUIS BLANC. **Discours politiques** (1848-1881). 1 vol. in-8. 7 fr. 50

PHILIPPSON. **La Contre-révolution religieuse au XVIe siècle.** 1 vol. in-8. 10 fr.

HENRARD (P.). **Henri IV et la princesse de Condé.** 1 vol. in-8. 6 fr.

NOVICOW. **La Politique internationale.** 1 fort vol. in-8. 7 fr.

REINACH (Joseph). * **La France et l'Italie devant l'histoire.** 1 vol. in-8. 1893. 5 fr.

LORIA (A.). **Les Bases économiques de la constitution sociale.** 1 vol. in-8. 1893. 7 fr. 50

BIBLIOTHÈQUE DE LA FACULTÉ DES LETTRES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

De l'authenticité des épigrammes de Simonide, par AM. HAUVETTE, professeur adjoiut. 1 vol. in-8. 5 fr.

* **Antinomies linguistiques**, par VICTOR HENRY, professeur à la Faculté. 1 vol. in-8. 2 fr.

Mélanges d'histoire du moyen âge, par MM. le Prof. LUCHAIRE, DUPONT, FERRIER et POUPARDIN. 1 vol. in-8. 3 fr. 50

Études linguistiques sur la Basse-Auvergne, phonétique historique du patois de Vinzelles (Puy-de-Dôme), par ALBERT DAUZAT, préface de M. le Prof. ANT. THOMAS. 1 vol. in-8. 6 fr.

De la flexion dans Lucrèce, par A. CARTAULT, professeur à la Faculté. 1 vol. in-8. 4 fr.

Le treize vendémiaire an IV, par HENRY ZIVY. 1 vol. in-8, avec 2 pl. hors texte. 4 fr.

TRAVAUX DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

PAUL FABRE. **La polyptyque du chanoine Benoît — Etude sur un manuscrit de la bibliothèque de Cambrai.** 3 fr. 50

MÉDÉRIC DUFOUR. **Sur la constitution rythmique et métrique du drame grec.** 1re série, 4 fr.; 2e série, 2 fr. 50; 3e série, 2 fr. 50.

A. PINLOCHE. * **Principales œuvres de Herbart.** (Pédagogie générale. — Esquisse de leçons pédagogiques. — Aphorismes et extraits divers). 7 fr. 50

A. PENJON. **Pensée et réalité**, de A. SPIR, trad. de l'allem. in-8°. 10 fr.

ANNALES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Lettres intimes de J.-M. Alberoni adressées au comte J. Rocca, ministre des finances du duc de Parme, par Emile BOURGEOIS, maître de conférences à l'École normale. 1 vol. in-8. 10 fr.

Sur l'hypothèse des atomes dans la science contemporaine, par Arthur HANNEQUIN, professeur à la Faculté des lettres. 1 v. in-8. 7 fr. 50

Saint Ambroise et la morale chrétienne au IVe siècle, par Raymond THAMIN, professeur au lycée Condorcet. 1 vol. in-8. 7 fr. 50

La république des Provinces-Unies, la France et les Pays-Bas espagnols, de 1630 à 1650, par A. WADDINGTON, professeur à la Faculté des lettres.
TOME I (1630-42). 1 vol. in-8. 6 fr. — TOME II (1642-50). 1 vol. in-8. 6 fr.

Le Vivarais, essai de géographie régionale, par BURDIN. 1 vol. in-8. 1898. 6 fr.

PUBLICATIONS HISTORIQUES ILLUSTRÉES

* **HISTOIRE ILLUSTRÉE DU SECOND EMPIRE**, par Taxile DELORD. 6 vol. in-8 colombier avec 500 gravures de FERAT, Fr. REGAMEY, etc. Chaque vol. broché, 8 fr. — Cart. doré, tr. dorées. 11 fr. 50

HISTOIRE POPULAIRE DE LA FRANCE, depuis les origines jusqu'en 1815. — 4 vol. in-8 colombier avec 1323 gravures. Chaque vol. broché, 7 fr. 50. — Cart. toile, tr. dorées. 11 fr

* De Saint-Louis à Tripoli

Par le Lac Tchad

Par le Lieutenant-Colonel **MONTEIL**

1 beau volume in-8 colombier, précédé d'une préface de **M. de Vogüé**, de l'Académie française, illustrations de RIOU. 1895. 20 fr.

Ouvrage couronné par l'Académie française (Prix Montyon)

RECUEIL DES INSTRUCTIONS

DONNÉES

AUX AMBASSADEURS ET MINISTRES DE FRANCE

DEPUIS LES TRAITÉS DE WESTPHALIE JUSQU'A LA RÉVOLUTION FRANÇAISE

Publié sous les auspices de la Commission des archives diplomatiques au Ministère des Affaires étrangères.

Beaux volumes in-8 raisin, imprimés sur papier de Hollande, avec Introduction et notes.

I. — **AUTRICHE**, par M. Albert Sorel, de l'Académie française. 20 fr.
II. — **SUÈDE**, par M. A. Geffroy, de l'Institut................ 20 fr.
III. — **PORTUGAL**, par le vicomte de Caix de Saint-Aymour..... 20 fr.
IV et V. — **POLOGNE**, par M. Louis Farges, 2 vol............. 30 fr.
VI. — **ROME**, par M. G. Hanotaux, de l'Académie française..... 20 fr.
VII. — **BAVIÈRE, PALATINAT ET DEUX-PONTS**, par M. André Lebon. 25 fr.
VIII et IX. — **RUSSIE**, par M. Alfred Rambaud, de l'Institut. 2 vol. Le 1er vol. 20 fr. Le second vol....................... 25 fr.
X. — **NAPLES ET PARME**, par M. Joseph Reinach.............. 20 fr.
XI. — **ESPAGNE** (1649-1750), par MM. Morel-Fatio et Léonardon (tome I).. 20 fr.
XII et XII *bis*. — **ESPAGNE** (1750-1789) (t. II et III), par les mêmes (*sous presse*).
XIII. — **DANEMARK**, par A. Geffroy, de l'Institut............... 14 fr.
XIV et XV. — **SAVOIE-MANTOUE**, par M. Horric de Beaucaire (*sous presse*).

---

*INVENTAIRE ANALYTIQUE

DES

ARCHIVES DU MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES

PUBLIÉ

Sous les auspices de la Commission des archives diplomatiques

I. — **Correspondance politique de MM. de CASTILLON et de MARILLAC, ambassadeurs de France en Angleterre (1538-1540)**, par M. Jean Kaulek, avec la collaboration de MM. Louis Farges et Germain Lefèvre-Pontalis. 1 vol. in-8 raisin.............. 15 fr.
II. — **Papiers de BARTHÉLEMY, ambassadeur de France en Suisse**, de 1792 à 1797 (année 1792), par M. Jean Kaulek. 1 vol. in-8 raisin.. 15 fr.
III. — **Papiers de BARTHÉLEMY** (janvier-août 1793), par M. Jean Kaulek. 1 vol. in-8 raisin.......................... 15 fr.
IV. — **Correspondance politique de ODET DE SELVE, ambassadeur de France en Angleterre** (1546-1549), par M. G. Lefèvre-Pontalis. 1 vol. in-8 raisin.......................... 15 fr.
V. — **Papiers de BARTHÉLEMY** (septembre 1793 à mars 1794), par M. Jean Kaulek. 1 vol. in-8 raisin...................... 18 fr.
VI. — **Papiers de BARTHÉLEMY** (avril 1794 à février 1795), par M. Jean Kaulek. 1 vol. in-8 raisin...................... 20 fr.
VII. — **Papiers de BARTHÉLEMY** (mars 1795 à septembre 1796). *Négociations de la paix de Bâle*, par M. Jean Kaulek. 1 volume in-8 raisin.. 20 fr.

Correspondance des Deys d'Alger avec la Cour de France (1759-1833), recueillie par Eug. Plantet, attaché au Ministère des Affaires étrangères. 2 vol. in-8 raisin avec 2 planches en taille-douce hors texte. 30 fr.

Correspondance des Beys de Tunis et des Consuls de France avec la Cour (1577-1830), recueillie par Eug. Plantet, publiée sous les auspices du Ministère des Affaires étrangères. Tome I. In-8 raisin. (*Épuisé.*)
Tome II. 1 fort vol. in-8 raisin................................ 20 fr.
Tome III. 1 fort vol. in-8 raisin (*sous presse*).

REVUE PHILOSOPHIQUE

DE LA FRANCE ET DE L'ÉTRANGER

Dirigée par Th. Ribot, Professeur au Collège de France.

(24e *année*, 1899.)

Paraît tous les mois, par livraisons de 7 feuilles grand in-8, et forme chaque année deux volumes de 680 pages chacun.

Prix d'abonnement :

Un an, pour Paris, 30 fr. — Pour les départements et l'étranger, 33 fr.

La livraison........................ 3 fr.

Les années écoulées, chacune 30 francs, et la livraison, 3 fr.

***Première table des matières* (1876-1887). 1 vol. in-8............ 3 fr.**

Deuxième table des matières **(1888-1895). 1 vol. in-8............ 3 fr.**

La Revue philosophique n'est l'organe d'aucune secte, d'aucune école en particulier.

Tous les articles de fond sont signés et chaque auteur est responsable de son article. Sans professer un culte exclusif pour l'expérience, la direction, bien persuadée que rien de solide ne s'est fondé sans cet appui, lui fait la plus large part et n'accepte aucun travail qui la dédaigne.

Elle ne néglige aucune partie de la philosophie, tout en s'attachant cependant à celles qui, par leur caractère de précision relative, offrent moins de prise aux désaccords et sont plus propres à rallier toutes les écoles. La *psychologie*, avec ses auxiliaires indispensables, l'*anatomie* et la *physiologie du système nerveux*, la *pathologie mentale*, la *psychologie des races inférieures et des animaux*, les *recherches expérimentales des laboratoires*; — la *logique*; — les *théories générales fondées sur les découvertes scientifiques*; — l'*esthétique*; — les *hypothèses métaphysiques*, tels sont les principaux sujets dont elle entretient le public.

Plusieurs fois par an paraissent des *Revues générales* qui embrassent dans un travail d'ensemble les travaux récents sur une question déterminée: sociologie, morale, psychologie, linguistique, philosophie religieuse, philosophie mathématique, psycho-physique, etc.

La Revue désirant être, avant tout, un organe d'information, a publié depuis sa fondation le compte rendu de plus de quinze cents ouvrages. Pour faciliter l'étude et les recherches, ces comptes rendus sont groupés sous des rubriques spéciales: anthropologie criminelle, esthétique, métaphysique, théorie de la connaissance, histoire de la philosophie, etc. Ces comptes rendus sont, autant que possible, impersonnels, notre but étant de faire connaître le mouvement philosophique contemporain dans toutes ses directions, non de lui imposer une doctrine.

En un mot par la variété de ses articles et par l'abondance de ses renseignements elle donne un tableau complet du mouvement philosophique et scientifique en Europe.

Aussi a-t-elle sa place marquée dans les bibliothèques des professeurs et de ceux qui se destinent à l'enseignement de la philosophie et des sciences ou qui s'intéressent au développement du mouvement scientifique.

---

*REVUE HISTORIQUE

Dirigée par G. MONOD

Membre de l'Institut, maître de conférences à l'Ecole normale
Président de la section historique et philologique à l'Ecole des hautes études

(24e *année*, 1899.)

Paraît tous les deux mois, par livraisons grand in-8° de 15 feuilles et forme par an trois volumes de 500 pages chacun.

CHAQUE LIVRAISON CONTIENT :

I. Plusieurs *articles de fond*, comprenant chacun, s'il est possible, un travail complet. — II. Des *Mélanges et Variétés*, composés de documents inédits d'une étendue restreinte et de courtes notices sur des points d'histoire curieux ou mal connus. — III. Un *Bulletin historique* de la France et de l'étranger, fournissant des renseignements aussi complets que possible sur tout ce qui touche aux études historiques. — IV. Une *Analyse des publications périodiques* de la France et de l'étranger, au point de vue des études historiques. — V. Des *Comptes rendus critiques* des livres d'histoire nouveaux.

Prix d'abonnement :

Un an, pour Paris, 30 fr. — Pour les départements et l'étranger, 33 fr.

La livraison.. .... 6 fr.

Les années écoulées, chacune 30 francs, le fascicule, 6 francs.
Les fascicules de la 1re année, 9 francs.

Tables générales des matières.

I. — 1876 à 1880...	3 fr.;	pour les abonnés.	1 fr. 50
II. — 1881 à 1885...	3 fr.;	—	1 fr. 50
III. — 1886 à 1890...	5 fr.;	—	2 fr. 50
IV. — 1891 à 1895...	3 fr.;	—	1 fr. 50

ANNALES DES SCIENCES POLITIQUES

RECUEIL BIMESTRIEL

Publié avec la collaboration des professeurs et des anciens élèves de l'École libre des sciences politiques

(*Quatorzième année*, 1899)

COMITÉ DE RÉDACTION :

M. Émile BOUTMY, de l'Institut, directeur de l'École ; M. ALF. DE FOVILLE, de l'Institut, directeur de la Monnaie ; M. R. STOURM, ancien inspecteur des Finances et administrateur des Contributions indirectes ; M. Alexandre RIBOT, député, ancien ministre ; M. Gabriel ALIX ; M. L. RENAULT, professeur à la Faculté de droit ; M. André LEBON, ancien ministre des colonies ; M. Albert SOREL, de l'Académie française ; M. A. VANDAL, de l'Académie française ; Aug. ARNAUNÉ, Directeur au ministère des Finances ; M. Émile BOURGEOIS, maître de conférences à l'École normale supérieure ; Directeurs des groupes de travail, professeurs à l'École.

Secrétaire de la rédaction : M. A. VIALLATE.

Les sujets traités dans les *Annales* embrassent les matières suivantes : *Économie, politique, finances, statistique, histoire constitutionnelle, droits international, public et privé, droit administratif, législations civile et commerciale privées, histoire législative et parlementaire, histoire diplomatique, géographie économique, ethnographie, etc.*

CONDITIONS D'ABONNEMENT

Un an (du 15 janvier) : Paris, 18 fr. ; départements et étranger, 19 fr.
La livraison, 3 fr. 50.

Les trois premières années (1886–1887–1888) *se vendent chacune* **16** *francs, les livraisons, chacune* **5** *francs, la quatrième année* (1889) *et les suivantes se vendent chacune* **18** *francs, et les livraisons, chacune* **3** *fr.* **50**.

Revue mensuelle de l'École d'Anthropologie de Paris

(9e *année*, 1899)

PUBLIÉE PAR LES PROFESSEURS :

MM. CAPITAN (Anthropologie pathologique), Mathias DUVAL (Anthropogénie et Embryologie), Georges HERVÉ (Ethnologie), J.-V. LABORDE (Anthropologie biologique), André LEFÈVRE (Ethnographie et Linguistique), Ch. LETOURNEAU (Histoire des civilisations), MANOUVRIER (Anthropologie physiologique), MAHOUDEAU (Anthropologie zoologique), SCHRADER (Anthropologie géographique), H. THULIÉ, directeur de l'École.

Cette revue paraît tous les mois depuis le 15 janvier 1891, chaque numéro formant une brochure in-8 raisin de 32 pages, et contenant une leçon d'un des professeurs de l'École, avec figures intercalées dans le texte et des analyses et comptes rendus des faits, des livres et des revues périodiques qui doivent intéresser les personnes s'occupant d'anthropologie.

ABONNEMENT : France et Étranger, **10** fr. — Le Numéro, **1** fr.

ANNALES DES SCIENCES PSYCHIQUES

Dirigées par le Dr DARIEX

(9e *année*, 1899)

Les ANNALES DES SCIENCES PSYCHIQUES ont pour but de rapporter, avec force preuves à l'appui, toutes les observations sérieuses qui leur seront adressées, relatives aux faits soi-disant occultes : 1° de **télépathie**, de **lucidité**, de **pressentiment** ; 2° de **mouvements d'objets, d'apparitions objectives**. En dehors de ces chapitres de faits sont publiées des **théories** se bornant à la discussion des bonnes conditions pour observer et expérimenter ; des **analyses, bibliographies, critiques**, etc.

Les ANNALES DES SCIENCES PSYCHIQUES paraissent tous les deux mois par numéros de quatre feuilles in-8 carré (64 pages), *depuis le 15 janvier* 1891.

ABONNEMENT : Pour tous pays, **12** fr. — Le Numéro, **2** fr. **50**.

BIBLIOTHÈQUE SCIENTIFIQUE
INTERNATIONALE
Publiée sous la direction de M. Émile ALGLAVE

La *Bibliothèque scientifique internationale* est une œuvre dirigée par les auteurs mêmes, en vue des intérêts de la science, pour la populariser sous toutes ses formes, et faire connaître immédiatement dans le monde entier les idées originales, les directions nouvelles, les découvertes importantes qui se font chaque jour dans tous les pays. Chaque savant expose les idées qu'il a introduites dans la science et condense pour ainsi dire ses doctrines les plus originales.

On peut ainsi, sans quitter la France, assister et participer au mouvement des esprits en Angleterre, en Allemagne, en Amérique, en Italie, tout aussi bien que les savants mêmes de chacun de ces pays.

La *Bibliothèque scientifique internationale* ne comprend pas seulement des ouvrages consacrés aux sciences physiques et naturelles; elle aborde aussi les sciences morales, comme la philosophie, l'histoire, la politique et l'économie sociale, la haute législation, etc.; mais les livres traitant des sujets de ce genre se rattachent encore aux sciences naturelles, en leur empruntant les méthodes d'observation et d'expérience qui les ont rendues si fécondes depuis deux siècles.

Cette collection paraît à la fois en français et en anglais: à Paris, chez Félix Alcan; à Londres, chez C. Kegan, Paul et Cie; à New-York, chez Appleton.

LISTE DES OUVRAGES PAR ORDRE D'APPARITION

91 VOLUMES IN-8, CARTONNÉS A L'ANGLAISE. CHAQUE VOLUME : 6 FRANCS.

1. J. TYNDALL. * **Les Glaciers et les Transformations de l'eau,** avec figures. 1 vol. in-8. 6e édition. 6 fr.
2. BAGEHOT. * **Lois scientifiques du développement des nations** dans leurs rapports avec les principes de la sélection naturelle et de l'hérédité. 1 vol. in-8. 5e édition. 6 fr.
3. MAREY. * **La Machine animale,** locomotion terrestre et aérienne, avec de nombreuses fig. 1 vol. in-8. 5e édit. augmentée. 6 fr.
4. BAIN. * **L'Esprit et le Corps.** 1 vol. in-8. 6e édition. 6 fr.
5. PETTIGREW. * **La Locomotion chez les animaux,** marche, natation. 1 vol. in-8, avec figures. 2e édit. 6 fr.
6. HERBERT SPENCER. * **La Science sociale.** 1 v. in-8. 12e édit. 6 fr.
7. SCHMIDT (O.). * **La Descendance de l'homme et le Darwinisme.** 1 vol. in-8, avec fig. 6e édition. 6 fr.
8. MAUDSLEY. * **Le Crime et la Folie.** 1 vol. in-8. 6e édit. 6 fr.
9. VAN BENEDEN. * **Les Commensaux et les Parasites dans le règne animal.** 1 vol. in-8, avec figures. 3e édit. 6 fr.
10. BALFOUR STEWART. * **La Conservation de l'énergie,** suivi d'une Étude sur la *nature de la force*, par M. P. de SAINT-ROBERT, avec figures. 1 vol. in-8. 5e édition. 6 fr.
11. DRAPER. **Les Conflits de la science et de la religion.** 1 vo in-8. 9e édition. 6 f
12. L. DUMONT. * **Théorie scientifique de la sensibilité.** 1 vol. in-8 4e édition. 6 f
13. SCHUTZENBERGER. * **Les Fermentations.** 1 vol. in-8, avec fi 6e édit. 6 fr
14. WHITNEY. * **La Vie du langage.** 1 vol. in-8. 4e édit. 6 fr
15. COOKE et BERKELEY. * **Les Champignons.** 1 vol. in-8, avec figure 4e édition. 6 f
16. BERNSTEIN. * **Les Sens.** 1 vol. in-8, avec 91 fig. 5e édit. 6 f

17. BERTHELOT. * **La Synthèse chimique.** 1 vol. in-8. 8e édit. 6 fr.
18. NIEWENGLOWSKI (H.). * **La photographie et la photochimie.** 1 vol. in-8, avec gravures et une planche hors texte. 6 fr.
19. LUYS. * **Le Cerveau et ses fonctions,** avec figures. 1 vol. in-8. 7e édition. 6 fr.
20. STANLEY JEVONS. * **La Monnaie et le Mécanisme de l'échange.** 1 vol. in-8. 5e édition. 6 fr.
21. FUCHS. * **Les Volcans et les Tremblements de terre.** 1 vol. in-8, avec figures et une carte en couleur. 5e édition. 6 fr.
22. GÉNÉRAL BRIALMONT. * **Les Camps retranchés et leur rôle dans la défense des États,** avec fig. dans le texte et 2 planches hors texte. 3e édit. 6 fr.
23. DE QUATREFAGES. * **L'Espèce humaine.** 1 v. in-8. 12e édit. 6 fr.
24. BLASERNA et HELMHOLTZ. * **Le Son et la Musique.** 1 vol. in-8, avec figures. 5e édition. 6 fr.
25. ROSENTHAL. * **Les Nerfs et les Muscles.** 1 vol. in-8, avec 75 figures. 3e édition. *Epuisé.*
26. BRUCKE et HELMHOLTZ. * **Principes scientifiques des beaux-arts.** 1 vol. in-8, avec 39 figures. 4e édition. 6 fr.
27. WURTZ. * **La Théorie atomique.** 1 vol. in-8. 8e édition. 6 fr.
28-29. SECCHI (le père). * **Les Étoiles.** 2 vol. in-8, avec 63 figures dans le texte et 17 pl. en noir et en couleur hors texte. 3e édit. 12 fr.
30. JOLY. * **L'Homme avant les métaux.** 1 vol. in-8, avec figures. 4e édition. 6 fr.
31. A. BAIN. * **La Science de l'éducation.** 1 vol. in-8. 8e édit. 6 fr.
32-33. THURSTON (R.). * **Histoire de la machine à vapeur,** précédée d'une Introduction par M. Hirsch. 2 vol. in-8, avec 140 figures dans le texte et 16 planches hors texte. 3e édition. 12 fr.
34. HARTMANN (R.). * **Les Peuples de l'Afrique.** 1 vol. in-8, avec figures. 2e édition. 6 fr.
35. HERBERT SPENCER. * **Les Bases de la morale évolutionniste.** 1 vol. in-8. 5e édition. 6 fr.
36. HUXLEY. * **L'Écrevisse.** Introduction à l'étude de la zoologie. 1 vol. in-8, avec figures. 2e édition. 6 fr.
37. DE ROBERTY. * **De la Sociologie.** 1 vol. in-8. 3e édition. 6 fr.
38. ROOD. * **Théorie scientifique des couleurs.** 1 vol. in-8, avec figures et une planche en couleur hors texte. 2e édition. 6 fr.
39. DE SAPORTA et MARION. * **L'Évolution du règne végétal** (les Cryptogames). 1 vol. in-8 avec figures. 6 fr.
40-41. CHARLTON BASTIAN. * **Le Cerveau, organe de la pensée chez l'homme et chez les animaux.** 2 vol. in-8, avec figures. 2e éd. 12 fr.
42. JAMES SULLY. * **Les Illusions des sens et de l'esprit.** 1 vol. in-8, avec figures. 2e édit. 6 fr.
43. YOUNG. * **Le Soleil.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
44. DE CANDOLLE. * **L'Origine des plantes cultivées.** 4e édition. 1 vol. in-8. 6 fr.
45-46. SIR JOHN LUBBOCK. * **Fourmis, abeilles et guêpes.** Études expérimentales sur l'organisation et les mœurs des sociétés d'insectes hyménoptères. 2 vol. in-8, avec 65 figures dans le texte et 13 planches hors texte, dont 5 coloriées. 12 fr.
47. PERRIER (Edm.). **La Philosophie zoologique avant Darwin.** 1 vol. in-8. 3e édition. 6 fr.
48. STALLO. * **La Matière et la Physique moderne.** 1 vol. in-8, 2e éd., précédé d'une Introduction par Ch. Friedel. 6 fr.
49. MANTEGAZZA. **La Physionomie et l'Expression des sentiments.** 1 vol. in-8. 3e édit., avec huit planches hors texte. 6 fr.
50. DE MEYER. * **Les Organes de la parole et leur emploi pour la formation des sons du langage.** 1 vol. in-8, avec 51 figures, précédé d'une Introd. par M. O. Claveau. 6 fr.

51. DE LANESSAN. ***Introduction à l'Étude de la botanique** (le Sapin.) 1 vol. in-8, 2e édit., avec 143 figures dans le texte. 6 fr.
52-53. DE SAPORTA et MARION. ***L'Évolution du règne végétal** (les Phanérogames). 2 vol. in-8, avec 136 figures. 12 fr.
54. TROUESSART. ***Les Microbes, les Ferments et les Moisissures.** 1 vol. in-8, 2e édit., avec 107 figures dans le texte. 6 fr.
55. HARTMANN (R.). ***Les Singes anthropoïdes, et leur organisation comparée à celle de l'homme.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
56. SCHMIDT (O.). ***Les Mammifères dans leurs rapports avec leurs ancêtres géologiques.** 1 vol. in-8 avec 51 figures. 6 fr.
57. BINET et FÉRÉ. **Le Magnétisme animal.** 1 vol. in-8. 4e édit. 6 fr.
58-59. ROMANES. ***L'Intelligence des animaux.** 2 v. in-8. 2e édit. 12 fr.
60. F. LAGRANGE. **Physiologie des exercices du corps.** 1 vol. in-8. 7e édition. 6 fr.
61. DREYFUS. ***Évolution des mondes et des sociétés.** 1 vol. in-8. 3e édit. 6 fr.
62. DAUBRÉE. ***Les Régions invisibles du globe et des espaces célestes.** 1 vol. in-8 avec 85 fig. dans le texte. 2e édit. 6 fr.
63-64. SIR JOHN LUBBOCK. ***L'Homme préhistorique.** 2 vol. in-8, avec 228 figures dans le texte. 4e édit. 12 fr.
65. RICHET (CH.). **La Chaleur animale.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
66. FALSAN (A.). ***La Période glaciaire principalement en France et en Suisse.** 1 vol. in-8, avec 105 figures et 2 cartes. 6 fr.
67. BEAUNIS (H.). **Les Sensations internes.** 1 vol. in-8. 6 fr.
68. CARTAILHAC (E.). **La France préhistorique,** d'après les sépultures et les monuments. 1 vol. in-8, avec 162 figures. 2e édit. 6 fr.
69. BERTHELOT. ***La Révolution chimique, Lavoisier.** 1 vol. in-8. 6 fr.
70. SIR JOHN LUBBOCK. ***Les Sens et l'instinct chez les animaux,** principalement chez les insectes. 1 vol. in-8, avec 150 figures. 6 fr.
71. STARCKE. ***La Famille primitive.** 1 vol. in-8. 6 fr.
72. ARLOING. ***Les Virus.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
73. TOPINARD. ***L'Homme dans la Nature.** 1 vol. in-8, avec fig. 6 fr.
74. BINET (Alf.). ***Les Altérations de la personnalité.** 1 vol. in-8 avec figures. 6 fr.
75. DE QUATREFAGES (A.). ***Darwin et ses précurseurs français.** 1 vol. in-8. 2e édition refondue. 6 fr.
76. LEFÈVRE (A.). ***Les Races et les langues.** 1 vol. in-8. 6 fr.
77-78. DE QUATREFAGES. ***Les Emules de Darwin.** 2 vol. in-8 avec préfaces de MM. E. PERRIER et HAMY. 12 fr.
79. BRUNACHE (P.). ***Le Centre de l'Afrique. Autour du Tchad.** 1 vol. in-8, avec figures. 1894. 6 fr.
80. ANGOT (A.). ***Les Aurores polaires.** 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.
81. JACCARD. **Le pétrole, le bitume et l'asphalte** au point de vue géologique. 1 vol. in-8 avec figures. 6 fr.
82. MEUNIER (Stan.). **La Géologie comparée.** 1 vol. in-8, avec fig. 6 fr.
83. LE DANTEC. **Théorie nouvelle de la vie.** 1 vol. in-8, avec fig. 6 fr.
84. DE LANESSAN. **Principes de colonisation.** 1 vol. in-8. 6 fr.
85. DEMOOR, MASSART et VANDERVELDE. **L'évolution régressive en biologie et en sociologie.** 1 vol. in-8 avec gravures. 6 fr.
86. MORTILLET (G. de). **Formation de la Nation française.** 1 vol in-8, avec 150 gravures et 18 cartes. 6 fr.
87. ROCHÉ (G.). **La Culture des Mers** (piscifacture, pisciculture, ostréiculture). 1 vol. in-8, avec 81 gravures. 6 fr.
88. COSTANTIN (J.). **Les Végétaux et les Milieux cosmiques** (adaptation, évolution). 1 vol. in-8, avec 171 gravures. 6 fr
89. LE DANTEC. **L'évolution individuelle et l'hérédité.** 1 vol. in-8. 6 fr
90. GUIGNET et GARNIER. **La Céramique ancienne et moderne** 1 vol. avec grav. 6 fr
91. GELLÉ (E.-M.). **L'audition et ses organes.** 1 v. in-8 avec grav. 6 fr

LISTE PAR ORDRE DE MATIÈRES

DES 89 VOLUMES PUBLIÉS

DE LA BIBLIOTHÈQUE SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

Chaque volume in-8, cartonné à l'anglaise..... 6 francs.

SCIENCES SOCIALES

* **Introduction à la science sociale**, par HERBERT SPENCER. 1 vol. in-8. 12ᵉ édit. 6 fr.
* **Les Bases de la morale évolutionniste**, par HERBERT SPENCER. 1 vol. in-8. 4ᵉ édit. 6 fr.

Les Conflits de la science et de la religion, par DRAPER, professeur à l'Université de New-York. 1 vol. in-8. 8ᵉ édit. 6 fr.

* **Le Crime et la Folie**, par H. MAUDSLEY, professeur de médecine légale à l'Université de Londres. 1 vol. in-8. 5ᵉ édit. 6 fr.
* **La Monnaie et le Mécanisme de l'échange**, par W. STANLEY JEVONS, professeur à l'Université de Londres. 1 vol. in-8. 5ᵉ édit. 6 fr.
* **La Sociologie**, par DE ROBERTY. 1 vol. in-8. 3ᵉ édit. 6 fr.
* **La Science de l'éducation**, par Alex. BAIN, professeur à l'Université d'Aberdeen (Écosse). 1 vol. in-8. 7ᵉ édit. 6 fr.
* **Lois scientifiques du développement des nations** dans leurs rapports avec les principes de l'hérédité et de la sélection naturelle, par W. BAGEHOT. 1 vol. in-8. 5ᵉ édit. 6 fr.
* **La Vie du langage**, par D. WHITNEY, professeur de philologie comparée à Yale-College de Boston (États-Unis). 1 vol. in-8. 3ᵉ édit. 6 fr.
* **La Famille primitive**, par J. STARCKE, professeur à l'Université de Copenhague. 1 vol. in-8. 6 fr.

PHYSIOLOGIE

* **Les Illusions des sens et de l'esprit**, par James SULLY. 1 v. in-8. 2ᵉ édit. 6 fr.
* **La Locomotion chez les animaux** (marche, natation et vol), par J.-B. PETTIGREW, professeur au Collège royal de chirurgie d'Édimbourg (Écosse). 1 vol. in-8, avec 140 figures dans le texte. 2ᵉ édit. 6 fr.
* **La Machine animale**, par E.-J. MAREY, membre de l'Institut, prof. au Collège de France. 1 vol. in-8, avec 117 figures. 4ᵉ édit. 6 fr.
* **Les Sens**, par BERNSTEIN, professeur de physiologie à l'Université de Halle (Prusse). 1 vol. in-8, avec 91 figures dans le texte. 4ᵉ édit. 6 fr.
* **Les Organes de la parole**, par H. DE MEYER, professeur à l'Université de Zurich, traduit de l'allemand et précédé d'une introduction sur l'*Enseignement de la parole aux sourds-muets*, par O. CLAVEAU, inspecteur général des établissements de bienfaisance. 1 vol. in-8, avec 51 grav. 6 fr.

La Physionomie et l'Expression des sentiments, par P. MANTEGAZZA, professeur au Muséum d'histoire naturelle de Florence. 1 vol. in-8, avec figures et 8 planches hors texte. 3ᵉ édit. 6 fr.

* **Physiologie des exercices du corps**, par le docteur F. LAGRANGE. 1 vol. in-8. 7ᵉ édit. (Ouvrage couronné par l'Institut.) 6 fr.

La Chaleur animale, par CH. RICHET, professeur de physiologie à la Faculté de médecine de Paris. 1 vol. in-8, avec figures dans le texte. 6 fr.

Les Sensations internes, par H. BEAUNIS. 1 vol. in-8. 6 fr.

* **Les Virus**, par M. ARLOING, professeur à la Faculté de médecine de Lyon, directeur de l'école vétérinaire. 1 vol. in-8, avec fig. 6 fr.

Théorie nouvelle de la vie, par F. LE DANTEC, docteur ès sciences. 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.

L'évolution individuelle et l'hérédité, par *le même*. 1 vol. in-8. 6 fr.

L'audition et ses organes, par le Docᵗʳ E.-M. GELLÉ, membre de la Société de biologie. 1 vol. in-8 avec grav. 6 fr.

PHILOSOPHIE SCIENTIFIQUE

* **Le Cerveau et ses fonctions**, par J. LUYS, membre de l'Académie de médecine, médecin de la Charité. 1 vol. in-8, avec fig. 7ᵉ édit. 6 fr.
* **Le Cerveau et la Pensée chez l'homme et les animaux**, par CHARLTON BASTIAN, professeur à l'Université de Londres. 2 vol. in-8, avec 184 fig. dans le texte. 2ᵉ édit. 12 fr.
* **Le Crime et la Folie**, par H. MAUDSLEY, professeur à l'Université de Londres. 1 vol. in-8. 6ᵉ édit. 6 fr.
* **L'Esprit et le Corps**, considérés au point de vue de leurs relations, suivi d'études sur les *Erreurs généralement répandues au sujet de l'esprit*, par Alex. BAIN, prof. à l'Université d'Aberdeen (Écosse). 1 v. in-8. 6ᵉ éd. 6 fr.
* **Théorie scientifique de la sensibilité** : *le Plaisir et la Peine*, par Léon DUMONT. 1 vol. in-8. 3ᵉ édit. 6 fr.

* **La Matière et la Physique moderne**, par STALLO, précédé d'une préface par M. CH. FRIEDEL, de l'Institut. 1 vol. in-8. 2e édit. 6 fr.
Le Magnétisme animal, par Alf. BINET et Ch. FÉRÉ. 1 vol. in-8, avec figures dans le texte. 4e édit. 6 fr.
* **L'Intelligence des animaux**, par ROMANES. 2 v. in-8. 2e éd. précédée d'une préface de M. E. PERRIER, prof. au Muséum d'histoire naturelle. 12 fr.
* **L'Évolution des mondes et des sociétés**, par C. DREYFUS. In-8. 6 fr.
L'évolution régressive en biologie et en sociologie, par DEMOOR, MASSART et VANDERVELDE, prof. des Univ. de Bruxelles. 1 v. in-8, avec grav. 6 fr.
* **Les Altérations de la personnalité**, par Alf. BINET, directeur du laboratoire de psychologie à la Sorbonne. In-8, avec gravures. 6 fr.

ANTHROPOLOGIE

* **L'Espèce humaine**, par A. DE QUATREFAGES, de l'Institut, professeur au Muséum d'histoire naturelle de Paris. 1 vol. in-8. 12e édit. 6 fr.
* **Ch. Darwin et ses précurseurs français**, par A. DE QUATREFAGES. 1 v. in-8. 2e édition. 6 fr.
* **Les Émules de Darwin**, par A. DE QUATREFAGES, avec une préface de M. EDM. PERRIER, de l'Institut, et une notice sur la vie et les travaux de l'auteur par E.-T. HAMY, de l'Institut. 2 vol. in-8. 12 fr.
* **L'Homme avant les métaux**, par N. JOLY, correspondant de l'Institut. 1 vol. in-8, avec 150 gravures. 4e édit. 6 fr.
* **Les Peuples de l'Afrique**, par R. HARTMANN, professeur à l'Université de Berlin. 1 vol. in-8, avec 93 figures dans le texte. 2e édit. 6 fr.
* **Les Singes anthropoïdes** et leur organisation comparée à celle de l'homme, par R. HARTMANN, prof. à l'Univ. de Berlin. 1 vol. in-8, avec 63 fig. 6 fr.
* **L'Homme préhistorique**, par SIR JOHN LUBBOCK, membre de la Société royale de Londres. 2 vol. in-8, avec 228 gravures dans le texte. 3e édit. 12 fr.
La France préhistorique, par E. CARTAILHAC. In-8, avec 150 gr. 2e édit. 6 fr.
* **L'Homme dans la Nature**, par TOPINARD, ancien secrétaire général de la Société d'Anthropologie de Paris. 1 vol. in-8, avec 101 gravures. 6 fr.
* **Les Races et les Langues**, par André LEFÈVRE, professeur à l'École d'Anthropologie de Paris. 1 vol. in-8. 6 fr.
* **Le centre de l'Afrique. Autour du Tchad**, par P. BRUNACHE, administrateur à Aïn-Fezza (Algérie). 1 vol. in-8 avec gravures. 6 fr.
Formation de la Nation française, par G. de MORTILLET, professeur à l'École d'Anthropologie. In-8, avec 150 grav. et 18 cartes. 6 fr.

ZOOLOGIE

* **La Descendance de l'homme et le Darwinisme**, par O. SCHMIDT, professeur à l'Université de Strasbourg. 1 vol. in-8, avec figures. 6e édit. 6 fr.
* **Les Mammifères dans leurs rapports avec leurs ancêtres géologiques**, par O. SCHMIDT. 1 vol. in-8, avec 51 figures dans le texte. 6 fr.
* **Fourmis, Abeilles et Guêpes**, par sir JOHN LUBBOCK, membre de la Société royale de Londres. 2 vol. in-8, avec figures dans le texte, et 13 planches hors texte dont 5 coloriées. 12 fr.
* **Les Sens et l'instinct chez les animaux**, et principalement chez les insectes, par Sir JOHN LUBBOCK. 1 vol. in-8 avec grav. 6 fr.
* **L'Écrevisse**, introduction à l'étude de la zoologie, par Th.-H. HUXLEY, membre de la Société royale de Londres. 1 vol. in-8, avec 82 grav. 6 fr.
* **Les Commensaux et les Parasites** dans le règne animal, par P.-J. VAN BENEDEN, professeur à l'Université de Louvain (Belgique). 1 vol. in-8, avec 82 figures dans le texte. 3e édit. 6 fr.
* **La Philosophie zoologique avant Darwin**, par EDMOND PERRIER, de l'Institut, prof. au Muséum. 1 vol. in-8. 2e édit. 6 fr.
* **Darwin et ses précurseurs français**, par A. de QUATREFAGES, de l'Institut. 1 vol. in-8. 2e édit. 6 fr.
La Culture des mers en Europe (Pisciculture, piscifacture, ostréiculture), par G. ROCHÉ, insp. gén. des pêches maritimes. In-8, avec 81 grav. 6 fr.

BOTANIQUE — GÉOLOGIE

* **Les Champignons**, par COOKE et BERKELEY. 1 v. in-8, avec 110 fig. 4e éd. 6 fr.
* **L'Évolution du règne végétal**, par G. DE SAPORTA et MARION, prof. à la Faculté des sciences de Marseille :
* I. *Les Cryptogames*. 1 vol. in-8, avec 85 figures dans le texte. 6 fr.
* II. *Les Phanérogames*. 2 vol. in-8, avec 136 fig. dans le texte. 12 fr.

* **Les Volcans et les Tremblements de terre**, par FUCHS, prof. à l'Univ. de Heidelberg. 1 vol. in-8, avec 36 fig. 5e éd. et une carte en couleur. 6 fr.

* **La Période glaciaire**, principalement en France et en Suisse, par A. FALSAN. 1 vol. in-8, avec 105 gravures et 2 cartes hors texte. 6 fr.

* **Les Régions invisibles du globe et des espaces célestes**, par A. DAUBRÉE, de l'Institut. 1 vol. in-8, 2e édit., avec 89 gravures. 6 fr.

* **Le Pétrole, le Bitume et l'Asphalte**, par M. JACCARD, professeur à l'Académie de Neuchâtel (Suisse). 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.

* **L'Origine des plantes cultivées**, par A. DE CANDOLLE, correspondant de l'Institut. 1 vol. in-8. 4e édit. 6 fr.

* **Introduction à l'étude de la botanique** (*le Sapin*), par J. DE LANESSAN, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris. 1 vol. in-8. 2e édit., avec figures dans le texte. 6 fr.

* **Microbes, Ferments et Moisissures**, par le docteur L. TROUESSART. 1 vol. in-8, avec 108 figures dans le texte. 2e édit. 6 fr.

* **La Géologie comparée**, par STANISLAS MEUNIER, professeur au Muséum. 1 vol. in-8, avec figures. 6 fr.

Les Végétaux et les milieux cosmiques (adaptation, évolution), par J. COSTANTIN, maître de conférences, à l'École normale supérieure. 1 vol. in-8 avec 171 gravures. 6 fr.

CHIMIE

* **Les Fermentations**, par P. SCHUTZENBERGER, memb. de l'Institut. 1 v. in-8, avec fig. 6e édit. 6 fr.

* **La Synthèse chimique**, par M. BERTHELOT, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences. 1 vol. in-8. 8e édit. 6 fr.

* **La Théorie atomique**, par Ad. WURTZ, membre de l'Institut. 1 vol. in-8. 8e édit., précédée d'une introduction sur *la Vie et les Travaux* de l'auteur, par M. Ch. FRIEDEL, de l'Institut. 6 fr.

La Révolution chimique (*Lavoisier*), par M. BERTHELOT. 1 vol. in-8. 6 fr.

* **La Photographie et la Photochimie**, par H. NIEWENGLOWSKI. 1 vol. avec gravures et une planche hors texte. 6 fr.

ASTRONOMIE — MÉCANIQUE

* **Histoire de la Machine à vapeur, de la Locomotive et des Bateaux à vapeur**, par R. THURSTON, professeur à l'Institut technique de Hoboken, près de New-York, revue, annotée et augmentée d'une introduction par M. HIRSCH, professeur à l'École des ponts et chaussées de Paris. 2 vol. in-8, avec 160 figures et 16 planches hors texte. 3e édit. 12 fr.

* **Les Etoiles**, notions d'astronomie sidérale, par le P. A. SECCHI, directeur de l'Observatoire du Collège Romain. 2 vol. in-8, avec 68 figures dans le texte et 16 planches en noir et en couleurs. 2e édit. 12 fr.

* **Le Soleil**, par C.-A. YOUNG, professeur d'astronomie au Collège de New-Jersey. 1 vol. in-8, avec 87 figures. 6 fr.

* **Les Aurores polaires**, par A. ANGOT, membre du Bureau centra météorologique de France. 1 vol. in-8 avec figures. 6 fr.

PHYSIQUE

La Conservation de l'énergie, par BALFOUR STEWART, prof. de physique au collège Owens de Manchester (Angleterre). 1 vol. in-8 avec fig. 4e édit. 6 fr.

* **Les Glaciers et les Transformations de l'eau**, par J. TYNDALL, suivi d'une étude sur le même sujet, par HELMHOLTZ, professeur à l'Université de Berlin. 1 vol. in-8, avec fig. et 8 planches hors texte. 5e édit. 6 fr.

* **La Matière et la Physique moderne**, par STALLO, précédé d'une préface par Ch. FRIEDEL, membre de l'Institut. 1 vol. in-8. 2e édit. 6 fr.

THÉORIE DES BEAUX-ARTS

* **Le Son et la Musique**, par P. BLASERNA, prof. à l'Université de Rome, prof. à l'Université de Berlin. 1 vol. in-8, avec 41 fig. 4e édit. 6 fr.

* **Principes scientifiques des Beaux-Arts**, par E. BRUCKE, professeur à l'Université de Vienne. 1 vol. in-8, avec fig. 4e édit. 6 fr.

* **Théorie scientifique des couleurs** et leurs applications aux arts et à l'industrie, par O. N. ROOD, professeur à Colombia-College de New-York. 1 vol. in-8, avec 130 figures et une planche en couleurs. 6 fr.

La Céramique ancienne et moderne, par MM. GUIGNET, directeur des teintures à la Manufacture des Gobelins, et GARNIER, directeur du Musée de la Manufacture de Sèvres. 1 vol. in-8 avec grav. 6 fr.

RÉCENTES PUBLICATIONS

HISTORIQUES, PHILOSOPHIQUES ET SCIENTIFIQUES

qui ne se trouvent pas dans les collections précédentes.

ALAUX. **Esquisse d'une philosophie de l'être.** In-8. 1 fr.
— **Les Problèmes religieux au XIX° siècle.** 1 vol. in-8. 7 fr. 50
— **Philosophie morale et politique,** in-8. 1893. 7 fr. 50
— **Théorie de l'âme humaine.** 1 vol. in-8. 1895. 10 fr. (Voy. p. 2.)
ALTMEYER (J.-J.). **Les Précurseurs de la réforme aux Pays-Bas.** 2 forts volumes in-8. 12 fr.
AMIABLE (Louis). **Une loge maçonnique d'avant 1789.** (La loge des Neuf-Sœurs.) 1 vol. in-8. 1897. 6 fr.
ANSIAUX (M.). **Heures de travail et salaires,** étude sur l'amélioration directe de la condition des ouvriers industriels. 1 vol. in-8. 1896. 5 fr.
ARNAUNÉ (A.). **La monnaie, le crédit et le change.** in-8. 7 fr.
ARRÉAT. **Une Éducation intellectuelle.** 1 vol. in-18. 2 fr. 50
— **Journal d'un philosophe.** 1 vol. in-18. 3 fr. 50 (Voy. p. 2 et 5.)
AZAM. **Hypnotisme et double conscience,** avec préfaces et lettres de MM. PAUL BERT, CHARCOT et RIBOT. 1 vol. in-8. 1893. 9 fr.
BAETS (Abbé M. de). **Les Bases de la morale et du droit.** In-8. 6 fr.
BALFOUR STEWART et TAIT. **L'Univers invisible.** 1 vol. in-8. 7 fr.
BARBÉ (É.). **Le nabab René Madec.** Histoire diplomatique des projets de la France sur le Bengale et le Pendjab (1772-1808). 1894. 1 vol. in-8. 5 fr.
BARNI. **Les Martyrs de la libre pensée.** 1 vol. in-18. 2° édit. 3 fr. 50 (Voy. p. 5; KANT, p. 10; p. 15 et 31.)
BARTHÉLEMY-SAINT-HILAIRE. (Voy. pages 2, 5 et 9, ARISTOTE.)
— ***Victor Cousin,** sa vie, sa correspondance. 3 vol. in-8. 1895. 30 fr.
BAUTAIN (Abbé). **La Philosophie morale.** 2 vol. in-8. 12 fr.
BEAUNIS (H.). **Impressions de campagne** (1870-1871). In-18. 3 fr. 50
BÉNARD (Ch.). **Philosophie dans l'éducation classique.** In-8. 6 fr. (Voy. p. 9, ARISTOTE et PLATON; p. 10, HEGEL.)
BLANQUI. **Critique sociale.** 2 vol. in-18. 7 fr.
BLONDEAU (C.). **L'absolu et sa loi constitutive.** 1 vol. in-8. 1897. 6 fr.
BOILLEY (P.). **La Législation internationale du travail.** In-12. 3 fr.
— **Les trois socialismes** : anarchisme, collectivisme, réformisme. 3 fr. 50
BOURDEAU (Louis). **Théorie des sciences.** 2 vol. in-8. 20 fr.
— **La Conquête du monde animal.** In-8. 5 fr.
— **La Conquête du monde végétal.** In-8. 1893. 5 fr.
— **L'Histoire et les historiens.** 1 vol. in-8. 7 fr. 50
— ***Histoire de l'alimentation.** 1894. 1 vol. in-8. 5 fr. (V. p. 5.)
BOURDET (Eug.). **Principes d'éducation positive.** In-18. 3 fr. 50
— **Vocabulaire de la philosophie positive.** 1 vol. in-18. 3 fr. 50
BOUTROUX (Em.). ***De l'idée de loi naturelle dans la science et la philosophie.** 1 vol. in-8. 1895. 2 fr. 50. (V. p. 2 et 5.)
BOUSREZ (L.). **L'Anjou aux âges de la Pierre et du Bronze.** 1 vol. gr. in-8, avec pl. h. texte. 1897. 3 fr.
BUNGE (N.-Ch.). **Esquisses de littérature politico-économiq** 1 vol. in-8. 1898. 7 fr.
CARDON (G.). ***Les Fondateurs de l'Université de Douai.** In-8. 1(
CASTELAR (Emilio). **La politique européenne.** 2 vol. in-8. 1896, 18 Chacun. 3
CLAMAGERAN. **La Réaction économique et la démocratie.** 1 v. ii 1891. 1 fr.
— **La lutte contre le mal.** 1 vol. in-18. 1897. 3 fr.
COIGNET (Mme). * **Victor Considérant,** sa vie et son œuvre. in-8.

COLLIGNON (A.). ***Diderot**, sa vie et sa correspondance. In-12. 1895. 3 fr. 50

COMBARIEU (J.). ***Les rapports de la musique et de la poésie considérés au point de vue de l'expression**. 1893. 1 vol. in-8. 7 fr. 50

COSTE (Ad.). **Hygiène sociale contre le paupérisme.** In-8. 6 fr.

— **Nouvel exposé d'économie politique et de physiologie sociale.** In-18. 3 fr. 50 (Voy. p. 2 et 32.)

COUTURAT (Louis). ***De l'infini mathématique.** In-8. 1896. 12 fr.

DAURIAC. **Croyance et réalité.** 1 vol. in-18. 1889. 3 fr. 50

— **Le Réalisme de Reid.** In-8. 1 fr. (V. p. 2.)

DELBŒUF. **De la loi psychophysique.** In-18. 3 fr. 50 (V. p. 2.)

DENEUS. **De la réserve héréditaire des enfants.** In-8. 5 fr.

DENIS (Abbé Ch.). **Esquisse d'une apologie du Christianisme dans les limites de la nature et de la révélation.** 1 vol. in-12. 1898. 4 fr.

DERAISMES (Mlle Maria). **Œuvres complètes:**

— Tome I. **France et progrès.** — **Conférences sur la noblesse.** 1 vol. in-12. 1895. 3 fr. 50. — Tome II. **Eve dans l'humanité.** — **Les droits de l'enfant.** 1 vol. in-12. 1896. 3 fr. 50. — Tome III. **Nos principes et nos mœurs.** — **L'ancien devant le nouveau.** 1 vol. in-12. 1896. — Tome IV. **Lettre au clergé français. Polémique religieuse.** 1 vol. in-12. 1898. Chaque volume 3 fr. 50

DESCHAMPS. **La Philosophie de l'écriture.** 1 vol. in-8. 1892. 3 fr.

DESDOUITS. **La philosophie de l'inconscient.** 1893. 1 vol. in-8. 3 fr.

DOLLFUS (Ch.). **Lettres philosophiques.** In-18. 3 fr.

— **Considérations sur l'histoire.** In-8. 7 fr. 50

— **L'Ame dans les phénomènes de conscience.** 1 vol. in-18. 3 fr. 50

DROZ (Numa). **Etudes et portraits politiques.** 1 vol. in-8. 1895. 7 fr. 50

— **Essais économiques.** 1 vol. in-8. 1896. 7 fr. 50

— **La démocratie fédérative et le socialisme d'État.** In-12. 1 fr.

DUBUC (P.). ***Essai sur la méthode en métaphysique.** 1 vol. in-8. 5 fr.

DU CASSE (le Baron). **Le 5e corps de l'armée d'Italie en 1859.** Br. gr. in-8. 1898. 2 fr.

DUGAS (L.). ***L'amitié antique**, d'après les mœurs et les théories des philosophes. 1 vol. in-8. 1895. 7 fr. 50 (V. p. 2.)

DUNAN. ***Sur les formes à priori de la sensibilité.** 1 vol. in-8. 5 fr.

— **Les Arguments de Zénon d'Elée contre le mouvement.** 1 br. in-8. 1 fr. 50 (V. p. 2.)

DUVERGIER DE HAURANNE (Mme E.). **Histoire populaire de la Révolution française.** 1 vol. in-18. 4e édit. 3 fr. 50

Éléments de science sociale. 1 vol. in-18. 4e édit. 3 fr. 50

ESPINAS (A.). **Les Origines de la technologie.** 1 vol. in-8. 1897. 5 fr.

FABRE (J.). **Hist. de la philosophie.** Antiquité et Moyen âge. In-12. 3 fr. 50

FEDERICI. **Les Lois du progrès.** 2 vol. in-8. Chacun. 6 fr.

FERRÈRE (F.). **La situation religieuse de l'Afrique romaine** depuis la fin du IVe siècle jusqu'à l'invasion des Vandales. 1 v. in-8. 1898. 7 fr. 50

FERRIÈRE (Em.). **Les Apôtres**, essai d'histoire religieuse. 1 vol. in-12. 4 fr. 50

— **L'Ame est la fonction du cerveau.** 2 volumes in-18. 7 fr.

— **Le Paganisme des Hébreux jusqu'à la captivité de Babylone.** 1 vol. in-18. 3 fr. 50

— **La Matière et l'énergie.** 1 vol. in-18. 4 fr. 50

— **L'Ame et la vie.** 1 vol. in-18. 4 fr. 50

— **Les Erreurs scientifiques de la Bible.** 1 vol. in-18. 1891. 3 fr. 50

— **Les Mythes de la Bible.** 1 vol. in-18. 1893. 3 fr. 50

— **La cause première d'après les données expérimentales.** 1 vol. in-18. 1896. 3 fr. 50

— **Étymologie de 400 prénoms usités en France.** 1 vol. in-18. 1898. 1 fr. 50 (Voy. p. 32.

FLEURY (Maurice de). **Introduction à la médecine de l'Esprit.** 1 vol. in-8, 5e éd. 1898. 7 fr. 50

FLOURNOY. **Des phénomènes de synopsie.** In-8. 1893. 6 fr.

GAYTE (Claude). **Essai sur la croyance.** 1 vol. in-8. 3 fr.
GOBLET D'ALVIELLA. **L'idée de Dieu,** d'après l'anthr. et l'histoire. in-8. 6 f.
GOURD. **Le Phénomène.** 1 vol. in-8. 7 fr. 50
GREEF (Guillaume de). **Introduction à la Sociologie.** 2 vol. in-8. 10 fr.
— **L'évolution des croyances et des doctrines politiques.** 1 vol. in-12. 1895. 4 fr. (V. p. 6.)
GRIMAUX (Ed.). ***Lavoisier** (1748-1794), d'après sa correspondance et divers documents inédits. 1 vol. gr. in-8, avec gravures. 2e éd. 1896. 15 fr.
GRIVEAU (M.). **Les Éléments du beau.** Préface de M. SULLY-PRUDHOMME. In-18, avec 60 fig. 1893. 4 fr. 50
GUILLY. **La Nature et la Morale.** 1 vol. in-18. 2e édit. 2 fr. 50
GUYAU. **Vers d'un philosophe.** In-18. 3 fr. 50 (Voy. p. 3, 6 et 9.)
GYEL (le Dr E.). **L'être subconscient.** 1 vol. in-8. 4 fr.
HAURIOU (M.). **La science sociale traditionnelle.** 1 v. in-8. 1896. 7 fr. 50
HALLEUX (J.). **Les principes du positivisme contemporain,** exposé et critique. (Ouvrage récompensé par l'Institut). 1 vol. in-12. 1895. 3 fr. 50
HARRACA (J.-M.). **Contributions à l'étude de l'Hérédité et des principes de la formation des races.** 1 vol. in-18. 1898. 2 fr.
HIRTH (G.). **La Vue plastique, fonction de l'écorce cérébrale.** In-8. Trad. de l'allem. par L. ARRÉAT, avec grav. et 34 pl. 8 fr. (Voy. p. 6.)
— **Les localisations cérébrales en psychologie. Pourquoi sommes-nous distraits?** 1 vol. in-8. 1895. 2 fr.
HOCQUART (E.). **L'Art de juger le caractère des hommes sur leur écriture,** préface de J. CRÉPIEUX-JAMIN. Br. in-8. 1898. 1 fr.
HUXLEY.* **La Physiographie,** introduction à l'étude de la nature, traduit et adapté par M. G. LAMY. 1 vol. in-8. 3e éd., avec fig. 8 fr. (V. p. 6, 21 et 32.)
ICARD (S.). **Paradoxes ou vérités.** 1 vol. in-12. 1895. 3 fr. 50
JOYAU. **De l'invention dans les arts et dans les sciences.** 1 v. in-8. 5 fr.
— **Essai sur la liberté morale.** 1 vol. in-18. 3 fr. 50
— **La Théorie de la grâce et la liberté morale.** In-8. 2 fr. 50
KAUFMAN. **Étude de la cause finale et son importance au temps présent.** Trad. de l'allem. par Deiber. In-12. 1898. 2 fr. 50
KINGSFORD (A.) et MAITLAND (E.). **La Voie parfaite ou le Christ ésotérique,** précédé d'une préface d'Edouard SCHURÉ. 1 vol. in-8. 1892. 6 fr.
KUMS (A.). **Les choses naturelles dans Homère.** 1 vol. in-8. 1897. 5 fr.
LABORDE. **Les Hommes et les Actes de l'insurrection de Paris** devant la psychologie morbide. 1 vol. in-18. 2 fr. 50
LAURENT (O.). **Les Universités des deux mondes.** In-12. 3 fr. 50
LAVELEYE (Em. de). **De l'avenir des peuples catholiques.** In-8. 25 c.
— **L'Italie actuelle.** In-18. 3 fr. 50
— **L'Afrique centrale.** 1 vol. in-12. 3 fr.
— **Essais et Études.** Première série (1861-1875). 1 vol. in-8. 7 fr. 50. — Deuxième série (1875-1882). 1 vol. in-8. 7 fr. 50. — Troisième série (1892-1894). 1 vol. in-8. 7 fr. 50 (Voy. p. 7 et 15.)
LÉGER (C.). **La liberté intégrale,** esquisse d'une théorie des lois républicaines. 1 vol. in-12. 1896. 1 fr. 50
LETAINTURIER (J.). **Le socialisme devant le bon sens.** In-18. 1 fr. 50
LEVY (Albert). ***Psychologie du caractère.** In-8. 1896. 5 fr.
LÉVY (le Dr P.-E.). **L'éducation rationnelle de la volonté.** 1 vol. in-8. 1898. 4 fr.
LICHTENBERGER (A.). **Le socialisme au XVIIIe siècle.** Études sur les idées socialistes dans les écrivains français au XVIIIe siècle, avant la Révolution. 1 vol. in-8. 1895. 7 fr. 50 (Voy. p. 15.)
LOURBET (J.). **La femme devant la science contemporaine.** 1 vol. in-12. 1895. 2 fr. 50
MABILLEAU (L.). ***Histoire de la philosophie atomistique.** 1 vol. in-8. 1895. (Ouvrage couronné par l'Institut.) 12 fr.
MANACÉINE (Marie de). **L'anarchie passive et le comte Léon Tolstoï.** 1 vol. in-18. 2 fr.

MAINDRON (Ernest). ***L'Académie des sciences** (Histoire de l'Académie; fondation de l'Institut national; Bonaparte, membre de l'Institut). 1 beau vol. in-8 cavalier, avec 53 gravures dans le texte, portraits, plans, etc. 8 planches hors texte et 2 autographes. 12 fr.

MALON (Benoît). **Le Socialisme intégral.** Première partie : *Histoire des théories et tendances générales*. Grand in-8, 2e éd. 6 fr. — Deuxième partie : *Des réformes possibles et des moyens pratiques*. Grand in-8. 6 fr.

— **Précis théorique, historique et pratique de socialisme** (lundis socialistes). 1 vol. in-12. 1892. 3 fr. 50

MARSAUCHE (L.). **La Confédération helvétique d'après la constitution,** préface de M. Frédéric Passy. 1 vol. in-18. 1891. 3 fr. 50

MERCIER (Mgr). **Les origines de la psychologie contemporaine.** In-12. 1898. 5 fr.

MISMER (Ch.). **Principes sociologiques.** 1 vol. in-8. 2e éd. 1897. 5 fr.

MORIAUD (P.). **La question de la liberté et la conduite humaine.** 1 vol. in-12. 1897. 3 fr. 50

MOSSO (A.). **L'éducation physique de la jeunesse.** 1 vol. in-12, cart., préface du commandant Legros. 1895. 4 fr.

NAUDIER (Fernand). **Le socialisme et la révolution sociale.** 1894. 1 vol. in-18. 3 fr. 50

NETTER (A.). **La Parole intérieure et l'âme.** 1 vol. in-18. 2 fr. 50

NIZET. **L'Hypnotisme,** étude critique. 1 vol. in-12. 1892. 2 fr. 50

NOTOVITCH. **La Liberté de la volonté.** In-18. 3 fr. 50

NOVICOW (J.). **La Question d'Alsace-Lorraine,** critique du point de vue allemand. in-8. 1895. 1 fr. (V. p. 4, 7 et 15.)

NYS (Ernest). **Les Théories politiques et le droit international.** 1 vol. in-8. 1891. 4 fr.

PARIS (comte de). **Les Associations ouvrières en Angleterre** (Trades-unions). 1 vol. in-18. 7e édit. 1 fr. — Édition sur papier fort. 2 fr. 50

PAULHAN (Fr.). **Le Nouveau mysticisme.** 1 vol. in-18. 1891. 2 fr. 50 (Voy. p. 4, 7 et 32.)

PELLETAN (Eugène). ***La Naissance d'une ville** (Royan). In-18. 2 fr.

— ***Jarousseau, le pasteur du désert.** 1 vol. in-18. 2 fr.

— ***Un Roi philosophe : Frédéric le Grand.** In-18. 3 fr. 50

— **Droits de l'homme.** 1 vol. in-12. 3 fr. 50

— **Profession de foi du XIXe siècle.** In-12. 3 fr. 50 (V. p. 31.)

PEREZ (Bernard). **Thiery Tiedmann. Mes deux chats.** In-12. 2 fr.

— **Jacotot et sa Méthode d'émancipation intellect.** In-18. 3 fr.

— **Dictionnaire abrégé de philosophie.** 1893. in-12. 1 fr. 50 (V. p. 7.)

PHILBERT (Louis). **Le Rire.** In-8. (Cour. par l'Académie française.) 7 fr. 50

PHILIPPE (J.). **Lucrèce dans la théologie chrétienne** du IIIe au XIIIe siècle. 1 vol. in-8. 1896. 2 fr. 50

PIAT (Abbé C.). **L'Intellect actif ou Du rôle de l'activité mentale dans la formation des idées.** 1 vol. in-8. 3 fr. (V. p. 7.)

PICARD (Ch.). **Sémites et Aryens** (1893). In-18. 1 fr. 50

PICAVET (F.). **L'Histoire de la philosophie,** ce qu'elle a été, ce qu'elle peut être. In-8. 2 fr.

— **La Mettrie et la critique allemande.** 1889. In-8. 1 fr. (V. p. 8.)

PICTET (Raoul). **Étude critique du matérialisme et du spiritualisme par la physique expérimentale.** 1 vol. gr. in-8. 1896. 10 fr.

POEY. **Le Positivisme.** 1 fort vol. in-12. 4 fr. 50

— **M. Littré et Auguste Comte.** 1 vol. in-18. 3 fr. 50

PORT. **La Légende de Cathelineau.** In-8. 5 fr.

POULLET. **La Campagne de l'Est** (1870-1871). In-8, avec cartes. 7 fr.

***Pour et contre l'enseignement philosophique,** par MM. VANDEREM (Fernand), RIBOT (Th.), BOUTROUX (F.), MARION (H.), JANET (P.) et FOUILLÉE (A.) de l'Institut ; MONOD (G.), LYON (Georges), MARILLIER (L.), CLAMADIEU (abbé), BOURDEAU (J.), LACAZE (G.), TAINE (H.). 1894. In-18. 2 fr.

PRÉAUBERT. **La vie, mode de mouvement**, essai d'une théorie physique des phénomènes vitaux. 1 vol. in-8, 1897. 5 fr.
PRINS (Ad.). **L'organisation de la liberté et le devoir social.** 1 vol in-8. 1895. 4 fr.
PUJO (Maurice). * **Le règne de la grâce. L'idéalisme intégral.** 1894. 1 vol. in-18. 3 fr. 50
RIBOT (Paul). **Spiritualisme et Matérialisme.** 2e éd. 1 vol. in-8. 6 fr.
RUTE (Marie-Letizia de). **Lettres d'une voyageuse.** Vienne, Budapest, Constantinople. 1 vol. in-8. 1896. 3 fr.
SANDERVAL (O. de). **De l'Absolu.** La loi de vie. 1 vol. in-8. 2e éd. 5 fr.
— **Kahel. Le Soudan français.** In-8, avec gravures et cartes. 8 fr.
SECRÉTAN (Ch.). **Études sociales.** 1889. 1 vol. in-18. 3 fr. 50
— **Les Droits de l'humanité.** 1 vol. in-18. 1891. 3 fr. 50
— **La Croyance et la civilisation.** 1 vol. in-18. 2e édit. 1891. 3 fr. 50
— **Mon Utopie.** 1 vol. in-18. 3 fr. 50
— **Le Principe de la morale.** 1 vol. in-8. 2e éd. 7 fr. 50
— **Essais de philosophie et de littérature.** 1 vol. in-12. 1896. 3 fr. 50
SECRÉTAN (H.). **La Société et la morale.** 1 vol. in-12. 1897. 3 fr. 50
SÉE (Paul). **La question monétaire.** Br. gr. in-8. 1898. 2 fr.
SILVA WHITE (Arthur). **Le développement de l'Afrique.** 1894. 1 fort vol. in-8 avec 15 cartes en couleurs hors texte. 10 fr.
SOLOWEITSCHIK (Leonty). **Un prolétariat méconnu**, étude sur la situation sociale et économique des juifs. 1 vol. in-8. 1898. 2 fr. 50
SOREL (Albert) **Le Traité de Paris du 20 novembre 1815.** In-8. 4 fr. 50
SPIR (A.). **Esquisses de philosophie critique.** 1 vol. in-18. 2 fr. 50
STOCQUART (Emile). **Le contrat de travail.** In-12. 1895. 3 fr.
STRADA (J.). **La loi de l'histoire.** 1 vol. in-8. 1894. 5 fr.
— **Jésus et l'ère de la science.** 1 vol. in-8. 1896. 5 fr.
— **Ultimum organum**, constitution scientifique de la méthode générale. Nouvelle édition. 2 vol. in-12. 1897. 7 fr.
— **La religion de la science et de l'esprit pur**, constitution scientifique de la religion. 2 vol. in-8. 1897. Chacun séparément. 7 fr.
TERQUEM (A.). **Science romaine à l'époque d'Auguste.** in-8. 3 fr.
THURY. **Le chômage moderne**, causes et remèdes. 1 v. in-12. 1895. 2 fr. 50
TISSOT. **Principes de morale.** 1 vol. in-8. 6 fr. (Voy. KANT, p. 10.)
ULLMO (L.). **Le Problème social.** 1897. 1 vol. in-8. 3 fr.
VACHEROT. **La Science et la Métaphysique.** 3 vol. in-18. 10 fr. 50
VAN BIERVLIET (J.-J.). **Éléments de Psychologie humaine.** 1 vol. in-8. 1895. 8 fr.
— **La Mémoire.** Br. in-8. 1893. 2 fr.
VIALLET (C.-Paul). **Je pense, donc je suis.** Introduction à la méthode cartésienne. 1 vol. in-12. 1896. 2 fr. 50
VIGOUREUX (Ch.). **L'Avenir de l'Europe** au double point de vue de la politique de sentiment et de la politique d'intérêt. 1892. 1 vol. in-18. 3 fr. 50
WEIL (Denis). **Le Droit d'association et le Droit de réunion devant** les chambres et les tribunaux. 1893. 1 vol. in-12. 3 fr. 50
— **Les Élections législatives.** Histoire de la législation et des mœurs. 1 vol. in-18. 1895. 3 fr. 50
WUARIN (L.). **Le Contribuable.** 1 vol. in-16. 3 fr. 50
WULF (M. de). **Histoire de la philosophie scolastique dans les Pays Bas et la principauté de Liège jusqu'à la Révol. franç.** In-8. 5 fr.
— **Sur l'esthétique de saint Thomas d'Aquin.** In-8. 1 fr. 5(
ZIESING (Th.). **Érasme ou Salignac.** Étude sur la lettre de François Rabelais. 1 vol. gr. in-8. 4 f
ZOLLA (D.). **Les questions agricoles d'hier et d'aujourd'hui.** 189 1895. 2 vol. in-12. Chacun. 3 fr. 5